

ÁLVARO AMORETTI LISBOA

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO  
HIDROGEOLÓGICA DO AQÜÍFERO CÁRSTICO,  
COMPARTIMENTO DE SÃO MIGUEL**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-Graduação em Geologia, Área de Concentração Geologia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho

Co-orientadores:

Prof. Dr. André Virmond Lima Bittencourt

Prof. Dr. Donizeti Antonio Giusti

CURITIBA

1997

## **AGRADECIMENTOS**

O ser humano apresenta como uma de suas principais características, a vida em grupo e o caráter social de seu trabalho.

Minha gratidão a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização desta tarefa.

Ao Professor e amigo Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho, pela indispensável orientação e incansável estímulo prestado.

Aos colegas e professores do curso de pós-graduação, pela contribuição científica e a amizade com que fui honrado.

Aos colegas da SUDERHSA pelo companheirismo colaboração.

À minha família, pais, irmãos, filhos e, em especial, à minha esposa Rosenery, pelo carinho e confiança.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente colaboraram com este trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

## SUMÁRIO

	página
ÍNDICE .....	ii
LISTA DE FIGURAS .....	iv
LISTA DE FOTOGRAFIAS .....	v
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	27
3 CLIMA .....	32
4 GEOMORFOLOGIA .....	43
5 HIDROGRAFIA .....	54
6 GEOLOGIA .....	60
7 CONDICIONAMENTO DOS ELEMENTOS COMPARTIMENTAIS .....	77
8 ZONEAMENTO HIDROGEOLÓGICO DO COMPARTIMENTO .....	89
9 ZONEAMENTO COM VISTAS À EXPLORAÇÃO E USO DO SOLO .....	107
10 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127

## ÍNDICE

	página
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	1
1.1 PROBLEMÁTICA	2
1.1.1 <u>Disponibilidade hídrica superficial x demanda no Estado do Paraná</u>	2
1.1.2 <u>Condicionantes do conflito</u>	4
1.1.3 <u>Problemática na Região Metropolitana de Curitiba</u>	5
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 MÉTODOS EMPREGADOS E ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	16
1.4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	21
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	27
<b>3 CLIMA</b>	32
3.1 INFLUÊNCIA NA CARSTIFICAÇÃO	33
3.2 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA REGIONAL	36
3.3 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA LOCAL	39
<b>4 GEOMORFOLOGIA</b>	43
4.1 GEOMORFOLOGIA REGIONAL	44
4.2 GEOMORFOLOGIA LOCAL	47
<b>5 HIDROGRAFIA</b>	54
5.1 ASPECTOS REGIONAIS	55
5.2 HIDROGRAFIA DA R.M.C.	55
5.3 HIDROGRAFIA DA ÁREA EM ESTUDO	
<b>6 GEOLOGIA</b>	60
6.1 PRINCIPAIS UNIDADES GEOLÓGICAS NA ÁREA DE ESTUDO	61
6.1.1 <u>Complexo Gnaíssico-Migmatítico</u>	61
6.1.2 <u>Grupo Açunqui</u>	62
6.1.3 <u>Formação Capiçu</u>	65
6.1.4 <u>Formação Serra Geral (Intrusivas Básicas)</u>	66
6.1.5 <u>Formação Guabirotuba</u>	69
6.1.6 <u>Aluviões</u>	70
6.2 COMENTÁRIO SOBRE A EVOLUÇÃO GEOLÓGICA	71
<b>7 CONDICIONAMENTO DOS ELEMENTOS COMPARTIMENTAIS</b>	77
7.1 CONDICIONAMENTO MORFOLÓGICO	78



	página
7.2 CONDICIONAMENTO HIDROGRÁFICO .....	84
7.3 CONDICIONAMENTO CLIMÁTICO .....	87
<b>8 ZONEAMENTO HIDROGEOLÓGICO DO COMPARTIMENTO .....</b>	<b>89</b>
8.1 ÁREAS DE AFLORAMENTO DA ROCHA CARBONÁTICA .....	92
8.1.1 <u>zona de recarga do aquífero no compartimento</u> .....	92
8.1.2 <u>zona de descarga do aquífero no compartimento</u> .....	93
8.2 ÁREAS DE AFLORAMENTO DAS ROCHAS SILICATADAS .....	97
8.2.1 <u>cristas de composição quartzítico-filíticas</u> .....	97
8.2.2 <u>cristas de composição diabásica</u> .....	103
<b>9 ZONEAMENTO COM VISTAS A EXPLOTAÇÃO E USO DO SOLO .....</b>	<b>107</b>
9.1 PERFIL ATUAL DA OCUPAÇÃO E USO DO SOLO .....	108
9.2 DIRETRIZES PARA OCUPAÇÃO E USO DO SOLO .....	114
9.2.1 <u>áreas das rochas carbonáticas</u> .....	114
9.2.2 <u>áreas das rochas silicatadas</u> .....	118
<b>10 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>123</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>127</b>

## LISTA DE FIGURAS

	página
1 Mapa de bacias hidrográficas do Estado do Paraná .....	3
2 Mapa de qualidade das águas superficiais na RMC .....	6
3 Mapa de compartimentação RMC .....	8
4 Mananciais de abastecimento para Curitiba e RMC .....	11
5 Bloco-diagrama do modelado de relevo .....	15
6 Entradas e saídas de sistema hidrogeológico cárstico .....	20
7 Mapa de localização .....	22
8 Mapa de localização e acesso .....	24
9 Processos hidroquímicos, nos solos da zona de recarga .....	34
10 Histograma precipitação / evapotranspiração anual .....	40
11 Mapa de precipitação anual do Estado do Paraná .....	41
12 Mapa de precipitação / meses de inverno do Estado do Paraná .....	42
13 Mapa geológico com divisores de bacia .....	45
14 Representação esquemática de formas de absorção .....	51
15 Perfil geológico esquemático Curitiba - Almirante Tamandaré .....	57
16 Mapa de vazões mínimas do Estado do Paraná .....	59
17 Mapa geológico com realce de faixas carbonáticas .....	63
18 Modelo tridimensional representando o compartimento unitário .....	78
19 Mapa geológico da área com representação de limitantes .....	83
20 Hidrografia da área em estudo .....	85
21 Histograma de precipitação pluviométrica anual .....	87

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

	página
1 Ocupação urbana município de Colombo .....	9
2 Ocupação urbana município de Almirante Tamandaré .....	9
3 Vista do relevo sub-região montanhosa do Açungui .....	21
4 Vista do relevo sub-região montanhosa do Açungui .....	25
5 Contraste relevo montanhoso com várzea aplainada .....	25
6 Vista da igreja de São Miguel .....	26
7 Vista da igreja de São Miguel .....	26
8 Vista do relevo ondulado do planalto de Curitiba .....	46
9 Vista do relevo da zona montanhosa do Açungui .....	46
10 Vista do relevo enérgico, segundo direção NE-SW .....	48
11 Dolina típica com saturação em água .....	52
12 Sumidouro em paisagem doliniforme .....	53
13 Vista de campo de dolinas .....	53
14 Afloramento de dique de diabásio .....	67
15 Afloramento de dique de diabásio .....	68
16 Vista de dique de diabásio CdbSW .....	79
17 Vista de dique de diabásio CdbNE .....	80
18 Vista dos diques de diabásio CdbSW e CdbNE .....	80
19 Vista da crista quartzo-filítica CqfNW .....	81
20 Vista da crista quartzo-filítica CqfSE .....	82
21 Vista da zona de recarga com relevo ondulado .....	94
22 Zona de recarga com área dolinizada .....	95
23 Zona de recarga com dolina típica saturada em água .....	95
24 Ponto de descarga do aquífero .....	97
25 Zona de descarga com ponto de surgência .....	98
26 Ponto de descarga do aquífero .....	99
27 Linha de crista divisória CqfNW .....	100
28 Poço tubular nº 1 .....	101
29 Poço cacimba captando água do freático .....	102
30 Vista interna do poço cacimba .....	102

	página
31 Linha de crista divisória CdbSW .....	104
32 Linha de crista divisória CdbNE .....	104
33 Detalhe da crista divisória CdbNE .....	105
34 Afloramento de dique de diabásio CdbNE .....	106
35 Vista de vegetação atual .....	108
36 Detalhe de pulverização de agrotóxico .....	110
37 Detalhe de equipamento pulverização de agrotóxico .....	110
38 Detalhe de equipamento de lavagem de hortaliças .....	111
39 Detalhe de adensamento populacional recente .....	112
40 Detalhe de área de recarga .....	116
41 Detalhe de assentamento rural .....	120
42 Detalhe de poluição atmosférica .....	121
43 Detalhe de barramento de fonte .....	122

## RESUMO

O aquífero Carste está situado na parte norte da Região Metropolitana de Curitiba. A identificação, neste aquífero, de uma unidade compartimental com características hidrogeológicas próprias, a qual possa ser extrapolada para o todo, possibilita ao estabelecimento de uma política de uso sustentado e proteção ambiental do mesmo. A proteção e gerenciamento adequado do aquífero, depende da redefinição da unidade planejamento urbano para a Região Metropolitana de Curitiba, estabelecendo o meio físico como parâmetro de planejamento em substituição à bacia hidrográfica. Até o presente momento, os planos diretores para abastecimento público da cidade de Curitiba e arredores, são fundamentados na utilização de mananciais superficiais, em franco processo de degradação. Uma nova alternativa aventada é o uso do aquífero carste, com melhor qualidade e menores custos, carecendo no entanto de uma metodologia adequada para o seu estudo.

O aquífero cárstico apresenta uma relação direta com a existência de rochas carbonáticas com grande capacidade de dissolução, representadas pelos mármores. A massa carbonática é condicionada entre delimitantes impermeáveis representadas por cristas de filitos e quartzitos segundo direção preferencial NE-SW e diques de diabásio com direção preferencial de NW-SE. Os diques seccionam transversalmente as cristas, originando assim um padrão de unidades losangulares com comportamento hidrogeológico similar entre si. Em cada unidade, afloram dois tipos de rochas, respectivamente rochas carbonáticas e rochas silicatadas, com diferentes aptidões quanto ao uso e ocupação do solo. As zonas de recarga e descarga do aquífero situadas na área das rochas carbonáticas apresentam maiores restrições quanto ao uso do que a área das rochas silicatadas.

O manejo hídrico combinado das águas superficiais e subterrâneas é possível no compartimento, devido ao caráter impermeável das limitantes e a recarga artificial do mesmo pode promover sua regularização, durante os períodos de superávit hídrico. As vocações naturais de uso para a área do aquífero Carste são o potencial do manancial subterrâneo para abastecimento público, mineração de calcário, uso agrícola e eco-turismo. Não são recomendados nesta área o acatamento urbano em altas concentrações.

## ABSTRACT

Karst aquifer is situated in the north part of Curitiba Metropolitan Area. The identification in this aquifer, of a compartment unit with its own hydrogeological features, that can be extrapolated to the whole area, allow the establishment of a sustainable use and environmental protection policy for the area. An adequate aquifer management and protection, depends on a redefinition of the urban planning unit in Curitiba Metropolitan Area., establishing the physics aspects of the area as a planning parameter, instead the hydrographic basin. Up to now, the master plans of water for public supply to the city of Curitiba and surrounding areas, are based in the surface waters utilization, which are facing high process of environmental degradation.

A new alternative is the use of the Karst aquifer, with better water quality and lower costs, but requiring a representative methodology for its study. Karst aquifer is directly related with the existence of highly soluble carbonate rocks, represented by marbles. Carbonate mass is conditioned between impermeable boundaries represented by filite and quartzite crests according to preferential direction NE-SW and NW-SE for a diabase dykes. Dykes cross transversely the crests, resulting in a losangular pattern units with similar hydrogeological aspects. In each unit, we can identify two main lithology the carbonate and silicate rocks, with different ability for the land use and occupation. Aquifer recharge and discharge zones located in carbonate rocks requires more use restriction than the silicated rocks area.

Combined surface and ground water hydric management, is possible in the compartment due to the impermeability of the boundaries and aquifer artificial recharge during the rainy seasons, could promote its regularization. The natural use ability of Karst aquifer area is the ground water potential for public supply, agricultural use, marble mining, ecotourism. The establishment of high urban concentration at this area is not recommended.

## **1. INTRODUÇÃO**

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 PROBLEMÁTICA

#### 1.1.1 Disponibilidade hídrica superficial X Demanda no Estado do Paraná

O potencial hídrico superficial avaliado, encontra-se distribuído em duas grandes bacias, as quais apresentam a Serra do Mar como divisor.

#### **BACIA ATLÂNTICA :**

Está situada na porção leste da Serra do Mar; com um potencial hídrico estimado em 303 m<sup>3</sup>/s ou 107 bilhões de m<sup>3</sup>/ano, apresentado na Figura 1.

#### **AFLUÊNCIA DO RIO PARANÁ :**

Está situada na porção oeste da Serra do Mar, estende-se até os limites do rio Paraná e Paranapanema, com um potencial hídrico estimado de 3.407 m<sup>3</sup>/s ou 107 bilhões de m<sup>3</sup>/ano.

Desta forma o potencial hídrico superficial do Estado como um todo é de :  
3.710 m<sup>3</sup>/s ou 116 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/ano, apresentado na Figura 1, correspondendo a 36% do volume precipitado / ano.

Atualmente a relação entre a demanda requerida e a oferta de águas superficiais no Estado, é de aproximadamente 2%, com as seguintes participações:

Abastecimento urbano	25 m <sup>3</sup> /s
Abastecimento industrial	15 m <sup>3</sup> /s
Abastecimento rural	20 m <sup>3</sup> /s
Total	60 m <sup>3</sup> /s





<b>DEMANDA TOTAL</b>	<b>60 m<sup>3</sup>/s</b>
<b>DISPONIBILIDADE</b>	<b>3.710 m<sup>3</sup>/s</b>
<b>% DEMANDA TOTAL</b>	<b>&lt;      ≅ 2 % (da disponibilidade)</b>

Apesar da abundância relativa de recursos hídricos superficiais no estado do Paraná, onde a demanda total corresponde a 60 m<sup>3</sup>/s, ou o equivalente a menos de 2% da disponibilidade média, da ordem de 3.740 m<sup>3</sup>/s, existem áreas críticas no que tange ao atendimento das demandas.

#### 1.1.2 Condicionantes do conflito

O modelo de desenvolvimento urbano adotado, privilegia assentamentos urbanos junto a divisores de bacias hidrográficas, situando-se em zonas de cabeceira de drenagens, sempre a montante dos mananciais superficiais que são utilizados para abastecimento público.

As bacias de captação possuem áreas limitadas, para suportar o uso crescente de água para o abastecimento e, ao mesmo tempo, volume de água destinado à diluição dos efluentes gerados por este abastecimento, em sua maior parte lançado *in natura* na drenagem superficial. Esta situação é agravada pela migração da população rural, em direção aos grandes pólos urbanos, em busca de melhores oportunidades, as quais além de incrementar o consumo d'água, assentam-se na periferia destas cidades, normalmente junto aos fundos de vale, degradando mais ainda a qualidade dos mananciais de abastecimento. Como decorrência, as novas captações para o atendimento do incremento de demanda, vão distanciando-se cada vez mais, e com potenciais hidráulicos negativos em relação ao ponto de abastecimento, tornando-os cada vez mais onerosos.

A ampliação da área de captação, ultrapassa os limites urbanos, invadindo áreas rurais onde o uso indiscriminado de agrotóxicos, assoreamento das drenagens por perda de solo, encarecem a utilização destes mananciais devido à necessidade de sofisticação dos processos de tratamento, chegando em muitos casos à inviabilizar o seu uso.

### 1.1.3 Problemática na RMC

A Região Metropolitana de Curitiba (RMC), apresenta a maior taxa de crescimento de todas as capitais brasileiras nas duas últimas décadas. O racionamento de água diário, por conta disto, atinge atualmente em torno de 300.000 habitantes, o que representa aproximadamente 15 % da população. O adensamento populacional, por sua vez, faz com que rapidamente sejam atingidos os limites de suporte físico das áreas ocupadas, estabelecendo cada vez mais o decréscimo da qualidade de vida destas populações.

O suprimento de água, para os múltiplos usos das comunidades urbanas, corresponde a uma das variáveis do meio físico mais impactada, tendo em vista a degradação decorrente do lançamento direto dos poluentes oriundos da atividade humana, numa determinada região.

Considerando a compartimentação hidrográfica, a RMC está situada numa área abrangida por duas bacias hídricas : a bacia do Iguaçu e bacia do Ribeira, respectivamente, conforme Figura 2.





A bacia do altíssimo Iguaçu, corresponde a 46% da área total, comportando 87 % (1.900.000 habitantes) da população desta, apresenta sérias dificuldades, em termos de produção de água para abastecimento, devido a degradação da qualidade d'água de seus mananciais, pelo lançamento de efluentes domésticos e industriais na drenagem de superfície, em sua maior parte (60%) *in natura*.

A bacia do Ribeira, por outro lado, abrange 54 % da área total da RMC e abriga, atualmente apenas 13 % (284.000 habitantes). Os recursos hídricos nesta região, encontram-se mais preservados em termos de qualidade.

No que se refere ao potencial hídrico seguro para abastecimento, nota-se uma tendência nítida de aumento da vazão de base ( $Q_{10-7}$ ), na direção norte, acentuando-se este caráter na bacia do rio Ribeira, o que lhe confere uma maior vocação quanto a este fim.

Considerando-se a compartimentação do meio físico, a RMC divide-se em dois grandes compartimentos geológicos (ver a Figura 3), como se segue :

- Unidade do complexo Gnaíssico-Migmatítico.
- Unidade das rochas metamórficas do grupo Açungui.

A ocupação urbana da unidade das rochas metamórficas, tem sido protelada até um certo ponto, em função da irregularidade do relevo, e das vocações naturais quanto ao uso do solo da área, principalmente mineração e horticultura. Este quadro, no entanto já vem apresentando alterações, quando focalizamos as sedes municipais da Campo Largo, Almirante Tamandaré, Colombo e seus entornos, onde são evidentes os sinais de ocupação urbana desordenada, demonstrados nas Fotos n<sup>os</sup> 1 e 2.

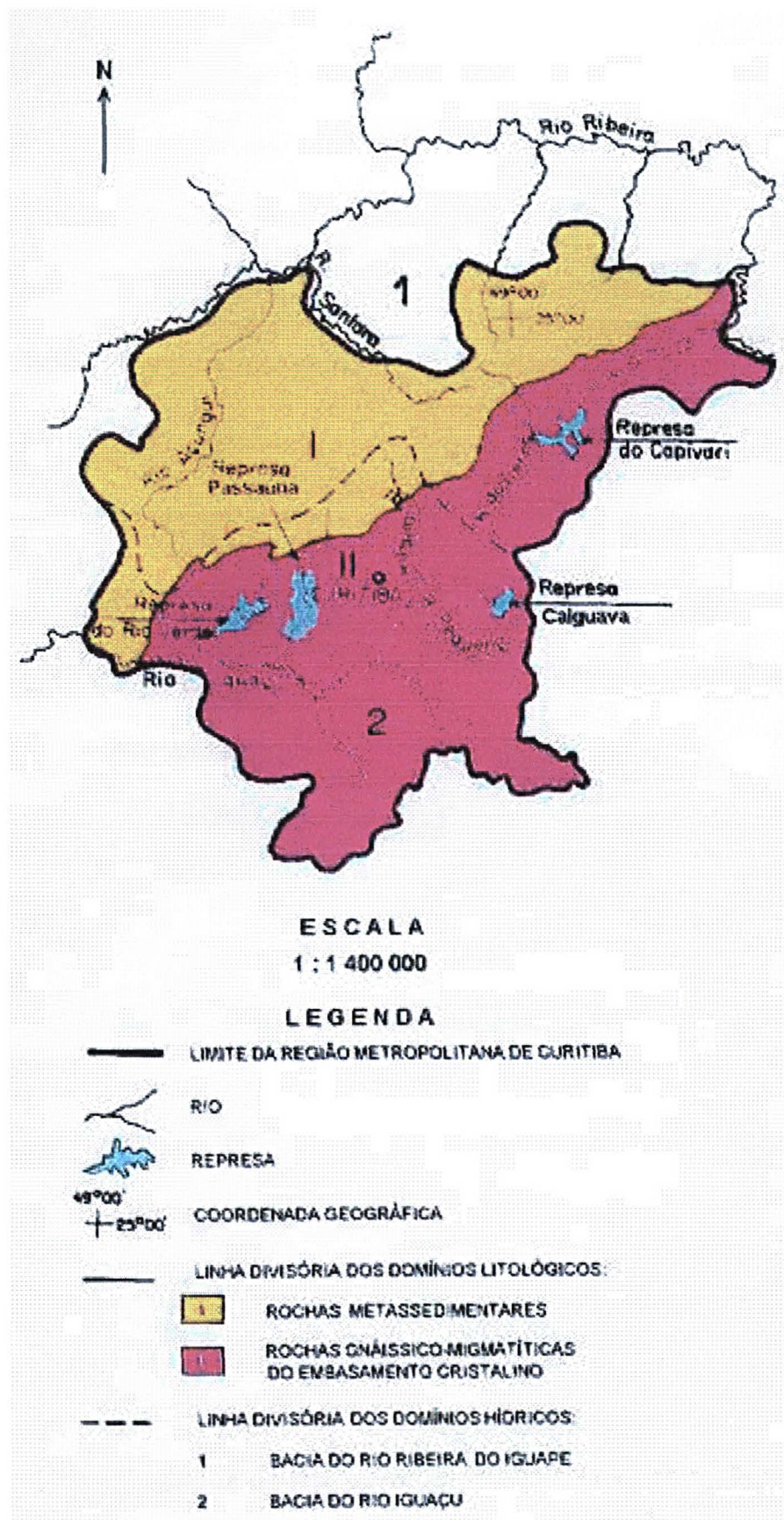


FIGURA 3. MAPA DE COMPARTIMENTAÇÃO DA RMC SEGUNDO O MEIO FÍSICO  
(fonte : Dalarmi, 1995 - Revista Saneare)



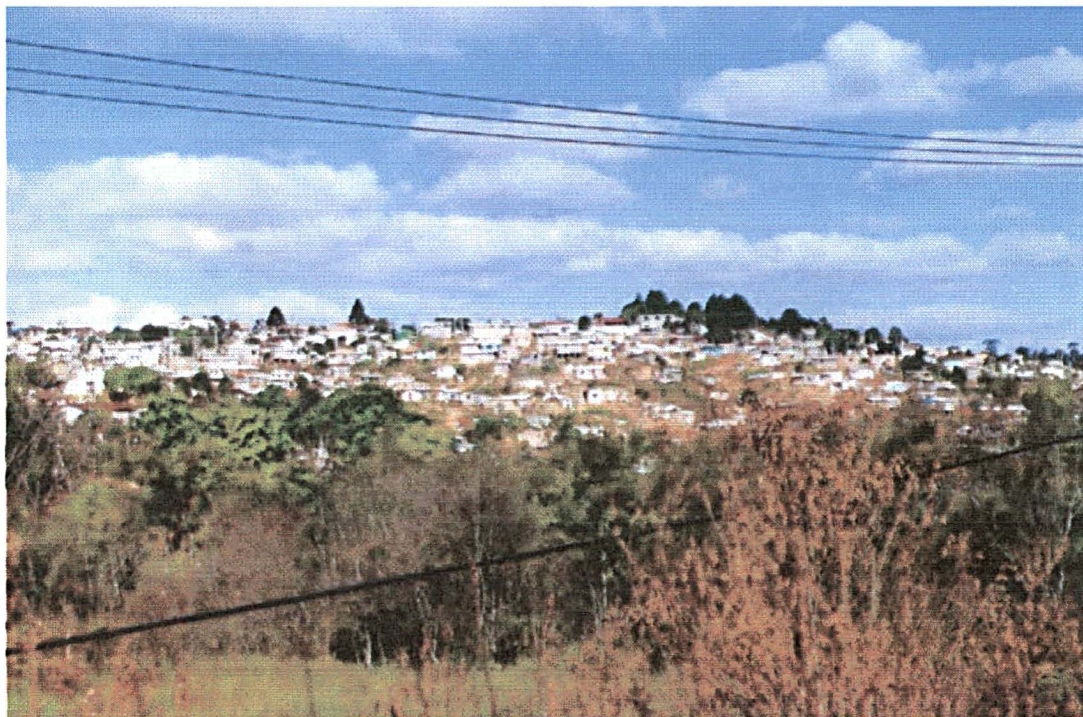


FOTO 1. OCUPAÇÃO URBANA DESORDENADA MUNICÍPIO DE COLOMBO  
PROXIMIDADES DO CONTATO DE ROCHAS DO EMBASAMENTO  
AÇUNGUI



FOTO 2. OCUPAÇÃO URBANA DESORDENADA MUNICÍPIO DE ALMIRANTE  
TAMANDARÉ PROXIMIDADES DO CONTATO DE ROCHAS DO  
EMBASAMENTO / AÇUNGUI

A população da cidade de Curitiba, no ano de 1970 era de 609.026 habitantes, em 1980 alcançou 1.024.975 habitantes e, em 1991, os dados preliminares do IBGE apontavam uma população total de 1.313.094 (caderno estatístico municipal, 1994).

As vazões captadas nos mananciais da Serra do Mar, da ordem de 120 l/s, foram suficientes para abastecer Curitiba até o ano de 1945; nessa época a população era de apenas 150.000 pessoas. Com o aumento da população da ordem de quatro vezes em apenas 20 anos, o abastecimento passou a ser feito através da captação do rio Irai, com uma produção máxima de 800 l/s, e através do rio Iguaçu, com mais 3.000 l/s. No final da década de 80, foi concluída a barragem do Passaúna, cuja capacidade nominal atual é 2.000 l/s. O total produzido atualmente corresponde a 5.800 l/s (DALARMI, 1995) (ver Figura 4).

A partir de procedimentos baseados na viabilização da potabilização de efluentes do rio Iguaçu, é proposto por Dalarmi (1995) a construção de mais cinco barragens para captação dos seguintes rios: Irai, Piraquara II, Pequeno, Miringuava e Cotia/Despique. Segundo este autor, os sistemas de produção de água estariam representados por três sistemas, a saber: Irai (barragens Irai, Piraquara II e Pequeno), Miringuava (barragem no rio Miringuava) e Cotia/Despique (barragens no rio Cotia/Despique). A previsão de produção destes sistemas até o final do ano 2020 é de 12,74 m<sup>3</sup>/s, incluindo a "vazão emergencial" de 600 l/s do aquífero cárstico que deveria ter entrado em operação em 1995. A interpretação da evolução desse plano é que as barragens Irai, Piraquara II e Pequeno deverão estar produzindo em torno de 9 m<sup>3</sup>/s no ano 2006, incluindo a vazão do atual sistema de abastecimento de Curitiba.





Com o funcionamento da barragem Miringuava, no ano 2013, a produção do sistema deverá aumentar para  $10,7 \text{ m}^3/\text{s}$ , e com o acréscimo a ser obtido com a barragem do Cotia/Despique, no ano 2020, a produção atingirá  $12,74 \text{ m}^3/\text{s}$ . Partindo do pressuposto de que a partir do ano 2000 o consumo per capita será em torno de 190 l/dia, a produção máxima prevista para este sistema, de  $12,74 \text{ m}^3/\text{s}$ , poderá abastecer uma população de aproximadamente 5.800.000 habitantes.

Todos os mananciais mencionados no trabalho de Dalarmi (1995) para o atendimento da demanda futura da RMC, estão situados na Unidade do complexo Gnaíssico-Migmatítico.

O crescimento populacional no altíssimo Iguaçu, embutindo o concomitante incremento das demandas d'água e geração de efluentes no mesmo sistema, é antagônico a existência de extensas áreas de proteção de manancial como proposto por Dalarmi (1995). Este antagonismo torna-se patente, quando avaliamos uma bacia de manancial como a do rio Palmital, em sua maior parte invadida pelo assentamento populacional desordenado. Neste rio a qualidade de sua água esta de tal forma degradada a ponto de, em breve espaço de tempo, descaracterizá-lo como manancial de abastecimento. A captação no rio Passaúna, responsável pelo abastecimento da parte oeste da cidade de Curitiba, apresenta em sua porção norte o aterro sanitário Lamenha Pequena, cujos efluentes contendo nitrogênio e fósforo, analisados próximo da ponte BR-277 fluem na taxa de 13,3 e 0,4 toneladas/ano, respectivamente (Rosa Filho, 1991) e Schaffer (1985). Tais valores são significativos para processos de eutrofização de lagos.

Nos últimos 20 anos, mesmo sob condições mais favoráveis para captação de recursos financeiros internos e externos, para implantação de projetos de abastecimento d'água incluindo barragens, a Sanepar executou apenas uma obra (barragem do

Passaúna), sendo temerária a expectativa de viabilização financeira de cinco barragens no mesmo intervalo de tempo.

O planejamento urbano regional da RMC, entende-se que deve ser feito em função das aptidões naturais do meio físico. A região ao Norte da linha de contato entre o complexo Gnaíssico-Migmatítico e Grupo Açungui deve preferencialmente destinar-se a áreas de proteção de manancial, enquanto as situadas a Sul da referida linha de contato, devem ser em parte liberadas para ocupação urbana. Cumpre ressaltar que a linha divisória acima comentada, não é coincidente com o divisor das bacias Iguaçu e Ribeira, colocando em segundo plano a bacia hidrográfica como unidade de planejamento urbano.

No que tange ao fornecimento de água para abastecimento principalmente da porção norte da RMC, o aquífero Cárstico representa uma opção tecnicamente segura e com custos reduzidos, além de sua utilização possibilitar um incremento de oferta d'água para o sistema Iguaçu provindo do sistema Ribeira.

Neste sentido é de fundamental importância o conhecimento detalhado das características do sistema hídricos superficiais e subterrâneos destas regiões. Desta maneira podem ser definidos os procedimentos gerenciais para proteger, planejar e utilizar de modo sustentado as disponibilidades existentes, bem como adequar o planejamento urbano conforme as vocações naturais dos seus diferentes compartimentos.

## 1.2 OBJETIVOS

Uma das alternativas para atendimento do incremento de demanda da RMC, é o aproveitamento do manancial subterrâneo armazenado no Aquífero Cárstico. Tal manancial está em situação favorável no que tange ao potencial hidráulico em relação ao abastecimento, além de suas melhores condições no que se refere ao aspecto de proteção ambiental comparado com as demais áreas da Região Metropolitana de Curitiba.

O Grupo Açungui é composto por uma seqüência de rochas epi-meta sedimentares, orientadas segundo a direção geral NE-SW, seccionada em sentido transversal na direção NW-SE por um notável enxame de diques de Diabásio. Em termos hidrogeológicos, este contexto morfoestrutural condiciona uma compartimentação com padrão geométrico tipicamente losangular, constituindo cada losângulo uma unidade com características similares às demais, porém com comportamento independente, conforme apresentado na Figura 5.

Este arcabouço hidrogeológico, em termos figurativos é semelhante a uma série de "tanques", interligados entre si por vertedouros de topo, correspondendo estes últimos à drenagem de superfície.

O objetivo da presente dissertação de mestrado, é definir as características hidrogeológicas de uma unidade compartimental deste aquífero, e suas interrelações com as demais limitantes, com possibilidades de reprodução para o todo.

De acordo com o objeto da dissertação, propõe-se através da reprodutibilidade dos conceitos obtidos no estudo da unidade compartimental, que os mesmos sirvam de base para o estabelecimento, por parte dos órgãos gestores de Recursos Hídricos no âmbito do estado do Paraná (Instituto Ambiental do Paraná - IAP e Superintendência dos

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - SUDERHSA), de política, para gerenciamento e proteção do aquífero cárstico.

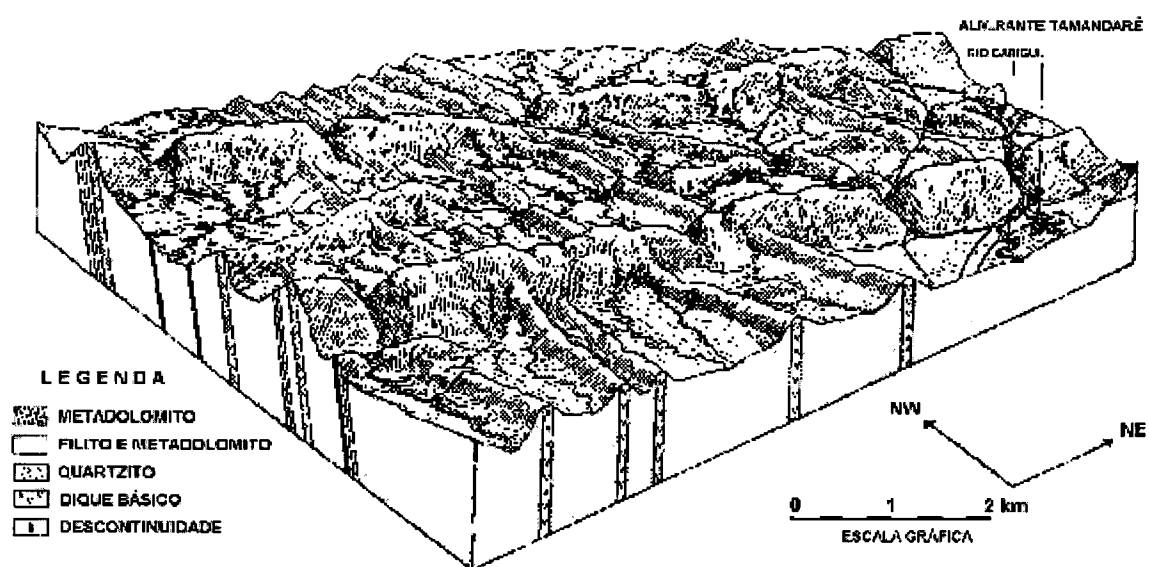


FIGURA 5. BLOCO-DIAGRAMA REPRESENTANDO O MODELADO DO RELEVO NA REGIÃO EM ESTUDO. Adaptado de Bigarella & Salamuni (1958a).

### 1.3 MÉTODOS EMPREGADOS E ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

As atividades desenvolvidas neste trabalho podem ser divididas em três fases distintas. A primeira fase refere-se ao levantamento e seleção do material bibliográfico e cartográfico existente, além da obtenção de dados hidroclimáticos da área. Os trabalhos bibliográficos que propiciaram os fundamentos teóricos desta investigação, referem-se aos estudos geológicos, hidrogeológicos e geomorfológicos em âmbito local e regional, assim como sobre os meios empregados na análise sistêmica e as técnicas disponíveis para caracterização e quantificação de aquíferos cársticos. As cartas plani-altimétricas em escala 1:10000 e 1:20000, utilizadas na confecção dos mapas temáticos, foram fornecidas pela COMEC - Coordenadoria da Região Metropolitana de Curitiba, enquanto que os dados de precipitação pluviométrica, temperatura, umidade relativa do ar e descargas foram levantados no Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (banco de dados regional do sistema de informações hidrológicas do DNAEE) e na Superintendência de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (banco de dados de informações hidrometeorológicas da SUDERHSA).

Na segunda fase, foram efetuadas a foto interpretação e as atividades de campo. A partir de fotografias aéreas em escala 1:70000 e 1:25000 foram traçados os principais elementos de foto interpretação.

As feições cársticas de superfície, a exemplo das dolinas, também foram traçadas na foto interpretação, porém em fotografias aéreas 1:8000, com posterior verificação em campo através de registro fotográfico. Os elementos morfológicos encontrados auxiliaram na complementação de mapas de feições cársticas disponíveis para a área.

As atividades de campo compreenderam a obtenção de dados geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos e geotécnicos. No caso dos dados geológicos, foram

geradas novas informações litológicas e estruturais, utilizados para complementar os mapas geológico-estruturais da área.

Por último, na terceira fase, procedeu-se à análise dos dados obtidos nas fases anteriores através da aplicação de métodos e técnicas de estudo disponíveis para sistemas hidrogeológicos cársticos. A integração e interpretação dos resultados permitiu a geração, entre outros produtos, de mapa geológico-estrutural, mapa de feições cársticas.

Devido ao caráter multidisciplinar das investigações em regiões cársticas e das particularidades apresentadas pelos processos químicos e hidrológicos associados, principalmente em subsuperfície, a abordagem sistêmica parece ser a mais adequada. De acordo com Kresic (1992), esse tipo de abordagem, está extremamente presente, com inúmeras aplicações, em vários campos da pesquisa científica, relacionando-se tanto com as leis da natureza quanto com as da sociedade. Segundo Sanchez (1992), a construção de modelos cársticos consistentes com a teoria geral dos sistemas possibilita a utilização de várias técnicas no entendimento do mecanismo de funcionamento do carste, principalmente para análises de correlação entre as entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) do sistema.

A teoria geral de sistemas evoluiu a partir do final dos anos 20, com base nas proposições de Defay, Bertalanffy (teoria organística) e Weiss (reação sistêmica) para aplicações nas áreas de biologia e termodinâmica (Christofolletti, 1979; Giannini, 1994). Dooge (1973 *apud* Tucci, 1987), revisando os conceitos fundamentais para definir sistema, concluiu que um sistema “é qualquer estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado tempo de referência interrelaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação”. Portanto, o termo sistema pode ser compreendido como um grupo de

constituintes, mais ou menos interdependentes, com vários tipos de interconexões, que atua como um mecanismo complexo respondendo através de uma saída a uma entrada. O sistema hidrogeológico cárstico é um exemplo típico de um conjunto de constituintes exposto a diferentes influências externas (precipitação, afluência de drenagens superficiais, temperatura do ar, etc.), que muda constantemente de estrutura (Kresic, 1992), e apresenta fluxos de saída em resposta aos fluxos de entrada.

A caracterização de qualquer sistema independe de sua natureza ou dimensão, pois todos os sistemas são partes de sistemas cada vez maiores e seus componentes são uma seqüência de subsistemas, os quais constituem sistemas completos em si mesmos. Sistemas abertos como a maioria dos sistemas naturais apresentam ainda interfaces com outros sistemas através da troca de matéria e energia. Os sistemas abertos dependem dos outros sistemas para sua manutenção, podendo também interferir nestes últimos com o que produzem (Mendonça, 1984 *apud* Cava, 1992).

A descrição externa de um sistema determina o seu padrão de operação. De acordo com Dooge (1968 *apud* Giannini, 1994), a forma mais usual de abordar esta operação é através das relações (canais ou funções de transferência) entre entradas e saídas de matéria, energia ou informação. Já a descrição interna determina as estruturas organizadas do sistema através de modelos de formas que referem-se tanto à geometria do sistema como à sua constituição (Giannini, 1994).

Kresic (1992), na descrição externa de um sistema hidrogeológico cárstico, caracteriza as entradas principais do sistema como a infiltração da precipitação, o desaparecimento de drenagens superficiais, drenagem de outros aquíferos vizinhos e recarga artificial; as saídas mais comuns seriam a evapotranspiração, a descarga para



as drenagens superficiais ou para outros aquíferos e a descarga de fontes, como pode ser visto na Figura 6.

Na descrição interna, a estrutura do sistema está relacionada, freqüentemente, ao tipo e grau da porosidade do aquífero. A porosidade primária formada durante a litogênese das rochas solúveis expostas aos processos de carstificação é geralmente muito menos expressiva do que a porosidade secundária. Essa porosidade resulta da ação de forças endógenas (tectônicas) e exógenas (atmosféricas). Assim, nos aquíferos cársticos são encontradas porosidades de blocos rochosos homogêneos, de fissuras e de grandes falhas carstificadas, porosidade de cavernas cársticas ou cavidades em geral e de depósitos clásticos presentes nas descontinuidades referidas anteriormente. Kresic (1992) define ainda os limites do sistema como internos e externos. Os primeiros são caracterizados, por exemplo, por zonas de falha de baixa permeabilidade e diferenças litológicas (mineralógicas) dos estratos ou unidades estratigráficas, e os últimos seriam exemplificados pelos contatos do aquífero cárstico com outras formações geológicas de baixa permeabilidade a impermeáveis.

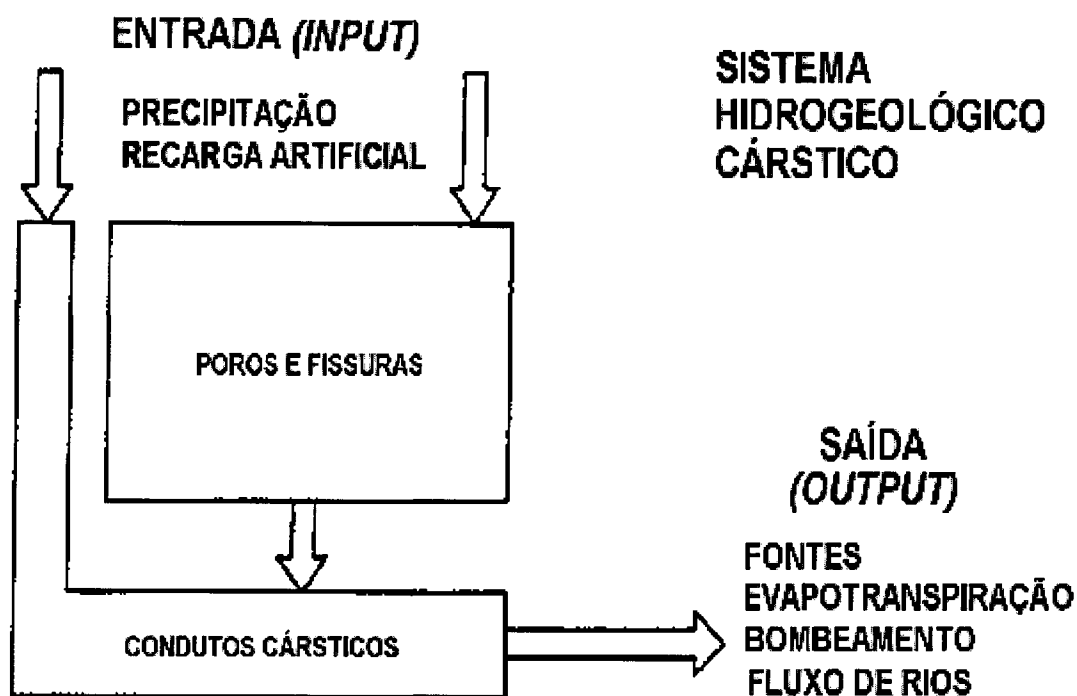


FIGURA 6. ENTRADAS E SAÍDAS DE UM SISTEMA HIDROGEOLÓGICO CÁRSTICO.  
Adaptado de Kresic (1992) e Behrens *et al.* (1992).

Na análise quantitativa dos elementos internos e externos dos sistemas hidrogeológicos cársticos, Kresic (1992) agrupa os métodos de estudo disponíveis em:

- a) Métodos hidrológicos: traçadores, curva de recessão, separação dos componentes do hidrograma e balanço hídrico;
- b) Métodos estocásticos estatísticos: distribuição probabilística, regressão, funções;
- c) Kernel, variograma e krigagem, e modelos estocásticos;
- d) Métodos hidrogeológicos: soluções analíticas (teste de bombeamento e teste de permeabilidade) e soluções numéricas, método da diferença finita, método do elemento finito e método do elemento limite;
- e) Outros : modelos de células mistas e modelos combinados (determinístico + estocástico).

No estudo do sistema hidrogeológico cárstico na área de São Miguel, em função do tipo, número e qualidade dos dados obtidos, aplicaram-se alguns métodos hidrológicos e hidrogeológicos.

#### 1.4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área estudada sob o ponto de vista geomorfológico enquadra-se no compartimento do Primeiro Planalto Paranaense, mais especificamente na sub-região Montanhosa do Açungui, ilustrado na Foto 3.



FOTO 3. VISTA DO RELEVO DA SUB-REGIÃO MONTANHOSA DO AÇUNGUI, MUNICÍPIO DE ALMIRANTE TAMANDARÉ (SÃO MIGUEL).

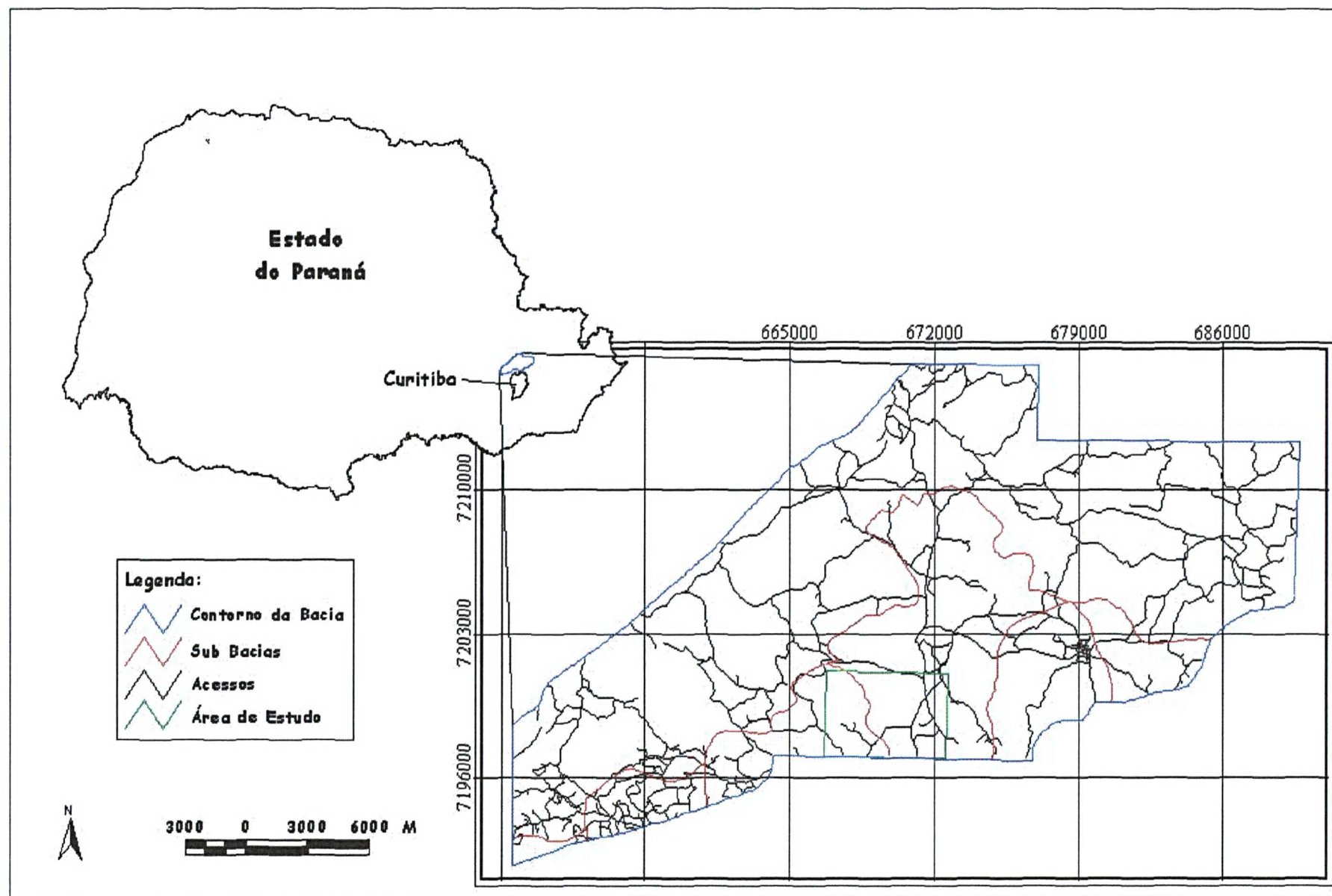


FIGURA 7. MAPA DE LOCALIZAÇÃO.

A nível político territorial, a área faz parte do setor norte da Região Metropolitana de Curitiba, situando-se no município de Almirante Tamandaré, a uma distância aproximada de 5,5 km a sudoeste da sede municipal.

O acesso principal à área, a partir do centro de Curitiba, é possibilitado através da rua Mateus Leme até o trevo de entrada na cidade de Almirante Tamandaré num trajeto de 10,5 km, tomando-se a partir deste ponto o contorno estrutural norte, à esquerda em direção ao Juquiri num trajeto 5,50 km, chegando-se assim ao encruzo com estrada não pavimentada, tomando-se, então novamente à esquerda e após 0,55 km chega-se a igreja de São Miguel, correspondendo esta ao ponto mais elevado da área, de onde pode-se visualizar o compartimento como um todo, apresentado nas Fotos 6 e 7.

Segundo coordenadas geográficas, delimita-se entre os paralelos  $25^{\circ} 20' 54''$  e  $25^{\circ} 18' 43''$  de latitude sul, e entre os meridianos  $49^{\circ} 22' 30''$  e  $49^{\circ} 17' 30''$  de longitude oeste, abrangendo uma área de aproximadamente  $28 \text{ km}^2$ , como pode ser visto na Figura 8.



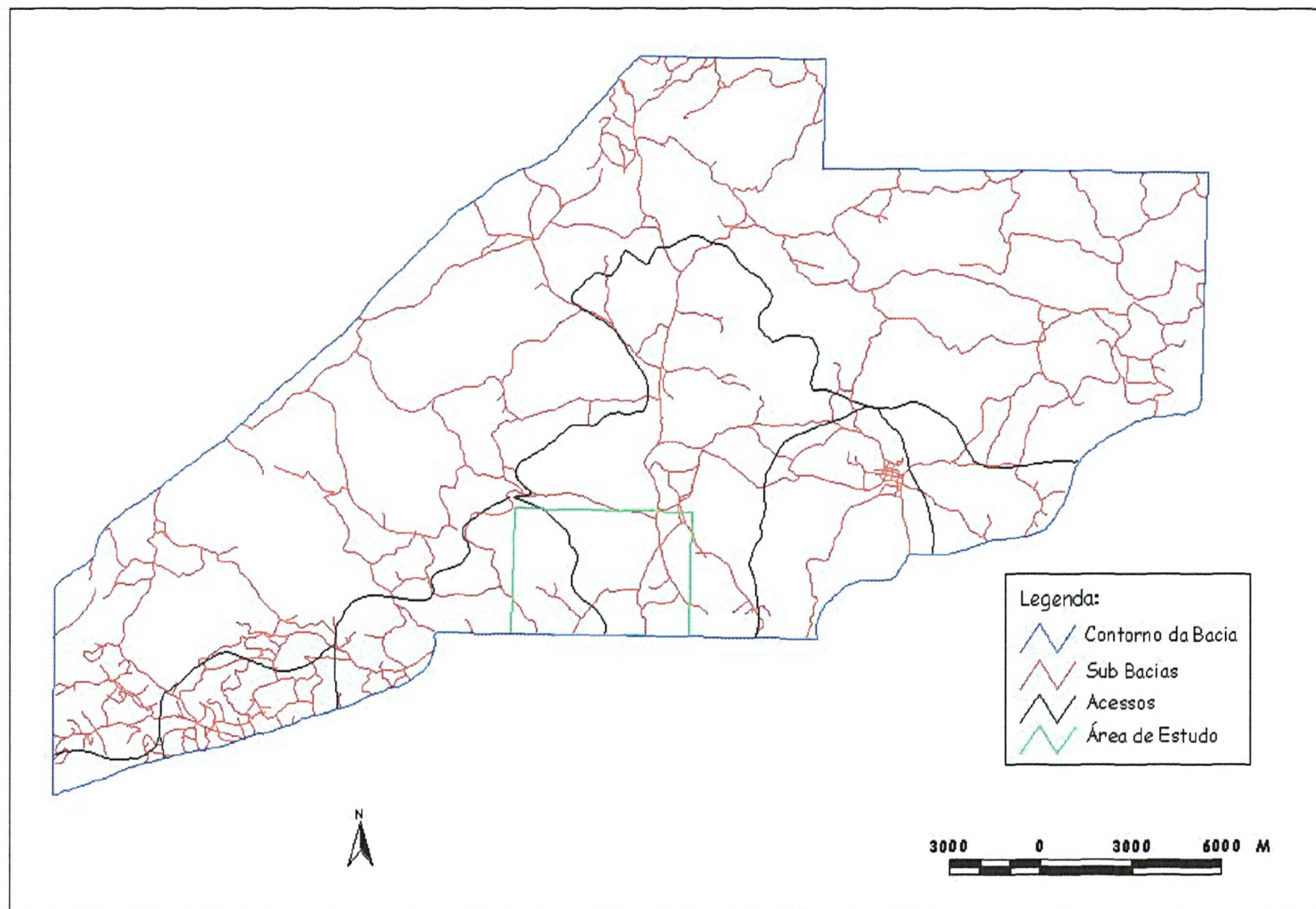


FIGURA 8. MAPA DE LOCALIZAÇÃO E ACESSO.



FOTO 4. VISTA DO RELEVO DA SUB-REGIÃO MONTANHOSA DO AÇUNGÜI AO FUNDO, OBTIDA NO COMPLEXO GNAÍSSICO-MIGMATÍTICO (EMBASAMENTO CRISTALINO).



FOTO 5. CONTRASTE DO RELEVO MONTANHOSO COM VÁRZEA APLAINADA DO RIO BARIGÜI, ALMIRANTE TAMANDARÉ. (vista próxima do relevo da foto 4.)





FOTO 6. VISTA DA IGREJA SÃO MIGUEL (foto tirada da parte baixa do compartimento).



FOTO 7. VISTA DA IGREJA SÃO MIGUEL (ponto mais alto do compartimento).



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O carste clássico, objeto das primeiras investigações científicas realizadas no final do século XIX, foi definido nas formações calcárias ao norte do Adriático, na península de Istria, no Noroeste da antiga Iugoslávia, próximo à fronteira italiana. O termo empregado para se referir a essa região no período romano era *Carsus* e *Carso*. No entanto, com a anexação desta pequena porção dos Alpes Dináricos pelo império austro-húngaro, o termo foi germanizado para *Karst*. Ambas as expressões provêm do termo indo-europeu *krs* que evoluiu para *kras* e significa pedra dura.

As feições cársticas características anteriormente citadas, comuns aos carstes típicos ou mediterrâneos e que se desenvolvem principalmente em áreas carbonáticas da Europa, são encontradas em outras regiões cársticas do globo, algumas vezes com pequenas variações. Nas regiões cársticas tropicais das Antilhas e da Ásia, também ocorrem outros tipos morfológicos designados de mogotes, cones e *cockpits*.

No Brasil, as regiões cársticas representam, segundo estimativa preliminar de Karmann (1989), aproximadamente 5 a 7 % do total da área do território nacional. Ainda de acordo com esse autor, os exemplos mais extensos e contínuos de terrenos cársticos estão associados às rochas carbonáticas do Grupo Bambuí na porção central do país, do Grupo Corumbá no Mato Grosso do Sul e do Grupo Araras no Mato Grosso. Também na região sudeste os terrenos cársticos estão presentes nas seqüências carbonáticas do Grupo Açungui e correlatos, tendo porém uma expressão em superfície muito menor do que nas outras áreas referidas.

Os primeiros estudos realizados em terrenos cársticos tratavam da morfologia cárstica. Posteriormente, em função da relação entre uma série de fenômenos de

erosão e dissolução subterrânea e da presença da água em subsuperfície, surgiu a hidrogeologia cárstica. Segundo Lladó (1970), este ramo da hidrogeologia é muito mais amplo do que qualquer outro, pois os fenômenos físico-químicos que se processam durante a circulação subterrânea da água em rochas carbonáticas não são encontrados em águas que circulam por outros tipos rochosos.

Os trabalhos técnico-científicos referentes às regiões cársticas são numerosos na literatura internacional, porém com mais ênfase para aqueles carstes em áreas temperadas do que para os de regiões tropicais e subtropicais. No Brasil, a bibliografia existente sobre terrenos cársticos é relativamente escassa, destacando-se os estudos espeleológicos em áreas carbonáticas dos estados de Minas Gerais, Bahia, São Paulo e Paraná, os trabalhos de viabilidade de barragens nos vales dos rios São Francisco e Ribeira do Iguape, as investigações dos fenômenos de subsidência e colapso associados à evolução de carstes cobertos em Cajamar-SP (Prandini *et al.*, 1987; Nakagawa *et al.*, 1987), os estudos do relevo da região de Pedro Leopoldo e Lagoa Santa - MG (Kohler, 1989). Mais recentemente, as pesquisas de Karmann (1989) sobre dinâmica e evolução da região cárstica do alto vale do rio Ribeira do Iguape. Na área de hidrogeologia cárstica, ressaltam-se os trabalhos de Silva (1984a) e Guerra (1986), nos terrenos carbonáticos do Grupo Bambuí em Minas Gerais e Bahia, respectivamente.

No Paraná, destacam-se os estudos geológicos realizados principalmente nas décadas de 50 e 60 por J.J. Bigarella e R. Salamuni (Bigarella, 1953; Bigarella & Salamuni, 1958 a e b, entre outros), nas faixas carbonáticas da porção sudeste do Estado. Sob o ponto de vista hidrogeológico, essa região começou a ser investigada pelos geólogos da antiga SUREHMA - Superintendência de Recursos Hídricos e

Meio Ambiente, a partir do início dos anos 90 (Costa Souza *et al.*, 1992). Esse grupo de pesquisadores, em especial os geólogos A.A. Lisboa e M.A. Fontana, introduziu o conceito de células morfoestruturais, limitadas por cristas filíticas e quartzíticas de direção NE e diques de diabásio de direção NW (Lisboa, 1992). Cada célula, com padrão geométrico losangular, constitui-se em uma unidade com características litológicas, estruturais e geomorfológicas similares às demais, mas com comportamento hidráulico independente. A região também foi compartimentada por esses pesquisadores em oito áreas de exploração do aquífero cárstico, as quais são denominadas de: Almirante Tamandaré, Colombo, Rio Branco do Sul, Tranqueira, Cabeceira do Atuba, São Miguel, Várzea do Capivari e Marmeleiro. Posteriormente, técnicos pesquisadores da GEOTECNICA (1992) apresentaram um relatório sobre o aproveitamento do aquífero cárstico ao Norte de Curitiba. Os resultados e modelos oriundos desses estudos foram publicados por Fraga (1994), em uma análise introdutória sobre o carste paranaense e, ainda, auxiliaram as investigações sobre os recursos hídricos no Paraná realizados pela JICA - Japan International Cooperation Agency (1995). Devem ser mencionados ainda os levantamentos de formas cársticas através de análises geomorfológicas, efetuados por Silva (1991) e Luz (1992), o monitoramento de fenômenos de subsidência do terreno em função da exploração do aquífero cárstico da região, realizados por Nadal *et al.* (1995), e a elaboração de cartas temáticas na região do aquífero cárstico coordenada pelo Prof. Mauro Salgado Monastier do DEGEO da UFPR (GEA - Geologia e Engenharia Ambiental Ltda, 1996).

Em 1996, buscando uma ação integrada entre os organismos do Estado e a transferência de tecnologias adequadas para estudo do aquífero, foi firmado

Convênio através da UFPR/SUDERHSA/Sanepar/COMEC com o Instituto Johaneum Research da Áustria. Tal convênio tem uma duração de três anos, a partir de setembro de 1996, estabelecendo a região do município de Colombo com área alvo, coincidente ao Projeto Carste Emergencial da Sanepar. Os estudos serão detalhados em uma escala 1:10.000, com aplicação de traçadores e definição do balanço hídrico, objetivando a quantificar o volume explorável para a área do projeto de forma sustentada.

### **3. CLIMA**

### 3 CLIMA

#### 3.1 INFLUÊNCIA NA CARSTIFICAÇÃO

Os elementos fisioclimáticos influenciam diretamente o funcionamento do sistema hidrogeológico cárstico, controlando a principal entrada do sistema, a precipitação. A parcela de água precipitada que efetivamente se infiltra e se transforma na recarga do aquífero cárstico depende do processo de interceptação vegetal e dos solos, que provocam diferentes índices de infiltração e, consequentemente, variações no volume armazenado. O poder de dissolução da água circulante pelo sistema, que permite a geração de feições cársticas típicas de superfície e subsuperfície, também é controlado pela presença de vegetação, de solos ácidos e pela temperatura.

O desenvolvimento dos fenômenos cársticos é condicionado pelo clima, pois, enquanto existir circulação hídrica, que depende diretamente do clima, ocorrerá a dissolução da rocha carbonática.

A importância dos fatores climáticos não se restringe somente em fornecer a água que agirá como solvente no desenvolvimento da carstificação, mas também promover o crescimento da vegetação e a atividade microbiana do solo que adicionarão uma quantidade extra de  $\text{CO}_2$  ao sistema (Summerfield, 1994).

A presença de vegetação nessas áreas propicia um aumento do conteúdo de  $\text{CO}_2$  no solo, através da respiração das raízes das plantas e da decomposição da matéria orgânica, influenciando diretamente a acidez da água e, consequentemente, seu poder de dissolução. Já nas regiões com clima árido e semi-árido as feições apresentam-se ausentes ou pobremente desenvolvidas, podendo ser feições reliquias de épocas climáticas mais úmidas.

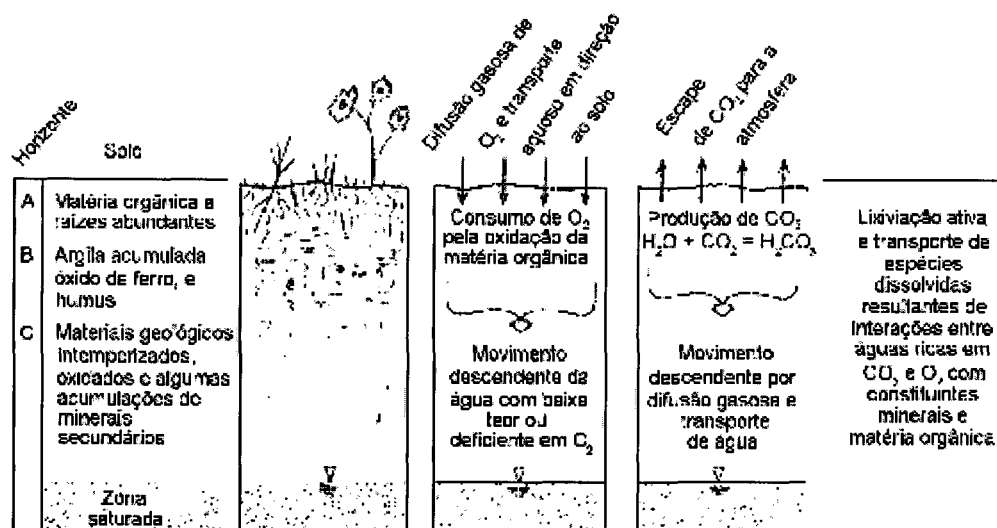


FIGURA 9. RESUMO ESQUEMÁTICO DOS PRINCIPAIS PROCESSOS HIDROQUÍMICOS NOS SOLOS DE ZONAS DE RECARGA. Adaptado de Freeze e Cherry ( 1979).

Outro elemento climático muito importante é a temperatura, pois ela faz variar o poder dissolvente da água em relação às rochas. Essa variação é tal que os carstes localizados em regiões com climas diferentes apresentam características distintas devido ao poder de dissolução diferente da água.

A temperatura é o fator físico controlador da solubilidade do  $CO_2$ , sendo que a quantidade de  $CO_2$  está na razão inversa da temperatura. Então, a água fria dissolve mais  $CO_2$  que a água quente e, quanto maior a quantidade de  $CO_2$  dissolvida, maior será a acidez e o poder dissolvente da água. Considerando-se a pressão de 1 atm, 1 litro de água pode dissolver a 25°C, 0,81 litros de  $CO_2$ ; a 15°C, 1,0 litro de  $CO_2$ ; e a 0°C, 2,15 litros de  $CO_2$  (Lladó, 1970).

Para compensar a diminuição do  $CO_2$  na água pelo aumento da temperatura, a solubilidade do bicarbonato de cálcio, que é o produto dissolvido e transportado



pela água, aumenta. Portanto, os fenômenos de dissolução e desenvolvimento do processo de carstificação nos climas quentes são tão ativos quanto nos climas frios.

Christofolletti (1980) admite que a carstificação é mais rápida nas regiões úmidas que nas regiões secas, desde que os demais fatores sejam iguais, mas não está totalmente certo de que ela seja mais rápida nas regiões tropicais que nas regiões frias. Enquanto que Lladó (1970) demonstrou que a água de origem glacial dissolve maior quantidade de rocha carbonática que as águas de regiões temperadas ou tropicais, mas que o efeito da água quente na solubilidade do bicarbonato de cálcio propicia um desenvolvimento maior, principalmente, dos carstes tropicais em relação aos glaciais.

Para Bigarella *et al.* (1994), a carstificação é mais intensa nos trópicos do que nas regiões temperadas, não só devido às temperaturas mais elevadas nessas áreas, mas também devido a maior precipitação (1000 a 4000 mm anuais) que contribui com um volume muito grande de água para atuar nos processos de dissolução das rochas carbonáticas e também nos de erosão mecânica. Os valores elevados das temperaturas de regiões tropicais (20 a 25°C) em comparação aos das regiões temperadas (5 a 6°C) tornam a água muito mais fluida, facilitando sua infiltração pelas fraturas e interstícios da rocha. As águas tropicais também apresentam maior agressividade devido à presença de ácidos de origem orgânica e do CO<sub>2</sub> produzido pela intensa atividade bioquímica nos solos.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA REGIONAL

“O Sul do Brasil é uma região das mais uniformes e de maior grau de unidades climáticas. Sua uniformidade é expressa pelo predomínio do clima mesotérmico super-úmido, sem estação seca e sua umidade pelo ritmo climático característico das regiões temperadas. Tais características são resultados dos fatores climáticos, uma vez que o sul do Brasil é uma região de passagem da frente polar em frontogênese o que torna esta região constantemente sujeita às bruscas mudanças de temperaturas, pelas sucessivas inversões de tais fenômenos frontogenéticos em qualquer estação do ano” (Nimer, 1977).

Na costa sul do Brasil, a acentuada amplitude topográfica, a orientação do relevo e a proximidade do oceano condicionam substancialmente o clima. As principais influências ocorrem na temperatura, na redução da amplitude térmica diária e anual, no aumento da umidade relativa do ar e na quantidade de chuva (IAPAR, 1995).

Os centros de ação atmosférica que atuam no Brasil Meridional são os anticlones subtropicais do Atlântico e do Pacífico, o anticiclone migratório Polar e o centro de baixa pressão, denominada Depressão do Chaco (MAACK, 1968).

Conforme MAACK, o anticiclone do Pacífico é de pouca interferência para a região sul-brasileira. Apenas ocasionalmente, no inverno, devido à sua posição mais meridional, próxima ao centro Migratório Polar, acentua-se a frontogênese na Frente Polar Pacífica. Esse fenômeno aumenta o acúmulo de ar frio no setor Atlântico, reforçando a Frente Polar Atlântica.

A área da Serra do Mar, no Paraná, é controlada, na maior parte do ano, pelo anticiclone do Atlântico Sul, que se caracteriza por ar subsidente, divergente e

límpido. Nele se originam os ventos alísios de SE-E e de NE-NW, que iniciam sobre o litoral brasileiro (ITCF, 1990).

Segundo MAACK (1968) e técnicos do IAPAR (1994) o anticiclone Migratório Polar desenvolve-se em latitudes subpolares pelo acúmulo de ar oriundo dos turbulões polares sobre os oceanos. Bifurca-se em duas frentes: Polar Atlântica e Polar Pacífica, o que ocorre principalmente pela presença dos Andes, barreira orográfica que se estende no sentido norte-sul.

A Depressão do Chaco constitui o mais notável dos centros negativos da América do Sul, sendo comumente interpretado como um centro de origem térmica por se definir especialmente no verão. Está ligado à dinâmica ondulatória da Frente Polar Atlântica e tem fundamental importância na atração dos sistemas intertropicais para o sul, conforme MAACK.

Na costa sul brasileira, várias massas exercem, de alguma maneira, influência nas condições de tempo, dentre as quais destacam-se: Tropical Atlântica, Tropical Continental, Equatorial Continental, Polar Pacífica e Polar Atlântica. A massa Tropical Atlântica individualiza-se no centro do anticiclone do Atlântico Sul. Em sua origem, é quente e úmida, com tendência à estabilidade pela subsidência superior das células de altas pressões. Dá origem aos chamados alísios de retorno, que sopram de NE para SW. Tem grande capacidade de penetração no interior do continente e possui uma inversão térmica que oscila em altitude: no inverno mais alta e no verão mais baixa, segundo MAACK.

A massa Tropical Continental é mais restrita ao verão, quando a Depressão do Chaco, dinamizada pela Frente Polar Atlântica, se superpõe a uma bolsa de ar fria. Assim, o ar quente e seco da planície central do continente, dotada de

subsidência superior pela importância de ar frio, torna-se dotada de movimento divergente. Forma-se a leste dos Andes e ao sul do Trópico de Capricórnio, numa região estreita, quente e árida (IAPAR, 1994).

A massa Equatorial Continental se forma na planície amazônica e no interior quente do continente, ao norte do Trópico, atingindo às vezes as serras costeiras do Brasil. É uma massa quente, de elevada umidade específica. O encontro dessa massa com a Tropical Continental nas áreas de movimentos ciclônicos da Baixa Térmica produz violenta ascensão da massa equatorial sobre a tropical, com subsequente desenvolvimento das abundantes nuvens convectivas e fortes aguaceiras (MAACK).

As massas polares, geralmente marítimas e frias, originam-se sobre a corrente marítima Antártica, nos oceanos Atlântico e Pacífico e em geral, principalmente no verão, a massa Polar Pacífica penetra no continente mais ao sul, apresentando corrente de SW que podem seguir dois rumos: num deles, sobre as planícies patagônicas e dos pampas, não sofre grandes modificações; no outro, mais a leste, sobre as águas frias da corrente das Malvinas, as massas tornam-se instáveis, com aumento de temperatura e umidade (MAACK).

A massa Polar Atlântica, com temperatura relativamente baixa, é acompanhada de um anticiclone frio que se dirige para o anticiclone Subtropical Atlântico, reativando-o com frequência, dirigindo-se para a costa montanhosa do Brasil, chegando no inverno até os 10° latitude sul e, no verão, até os 20°. Devido aos aumentos de temperatura e umidade adquiridos sobre a corrente quente do Brasil, as massas tornam-se acentuadamente mais instáveis quanto maior for o percurso sobre o mar. No inverno, o anticiclone frio que acompanha a massa Polar Atlântica

suaviza a instabilidade. No verão, essa massa possui espessura vertical reduzida, o que a impede, freqüentemente, de transportar as serras costeiras (IAPAR, 1995).

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA LOCAL

O tipo climático da região estudada, segundo Maack (1968) é classificado como **Cfb** de Koeppen, onde **C** indica climas pluviais temperados, com mês mais frio possuindo temperatura entre  $+ 18^{\circ}$  e  $- 3^{\circ}$  C; **f** indica sempre úmido e chuva em todos os meses do ano; **b** representa a temperatura do mês mais quente menos de  $22^{\circ}$  C, mas no mínimo quatro meses mais de  $10^{\circ}$  C.

De acordo com cartas climáticas básicas do Estado do Paraná (IAPAR, 1978), a média anual das temperaturas mínimas da região oscila entre  $11^{\circ}$  e  $12^{\circ}$  C, enquanto que a média anual das máximas fica entre  $23^{\circ}$  e  $24^{\circ}$  C. A média anual global está em torno de  $16^{\circ}$  e  $17^{\circ}$  C. O trimestre menos chuvoso (Junho-Julho-Agosto) apresenta precipitação entre 250 à 300 mm e o mais chuvoso (Dezembro-Janeiro-Fevereiro) com precipitação pluviométrica entre 600 e 700 mm.

A precipitação anual média da região é de 1400 mm, variando de um mínimo de 800 mm à um máximo de 2000 mm, correspondendo a anos de estiagem e anos mais chuvosos respectivamente.

Segundo Lladó (1970), nas regiões carbonáticas com precipitações superiores a 1000 mm/ano, o processo de carstificação apresenta elevada atividade. Naquelas regiões com precipitações da ordem de 600 a 400 mm/ano, a circulação hídrica, muitas vezes, possui um caráter intermitente, fazendo com que os fenômenos cársticos tenham atividade reduzida. Por fim, nas áreas muito secas, com precipitações inferiores a 200 mm/ano, a circulação hídrica é praticamente nula, ocorrendo elementos cársticos mortos, desenvolvidos em épocas de maior atividade

hídrica. Pode-se admitir, então, com certeza, a existência de episódios de carstificação gerados por ciclos climáticos que tendem a aumentar ou diminuir consideravelmente o volume de água que se infiltra e que circula pelos condutos cársticos.

O balanço hídrico anual normalmente, será positivo, isto é, com superavit d'água, estando este disponível para recarga dos aquíferos, e muitas vezes com sobras significativas correspondendo aos anos das grandes enchentes.

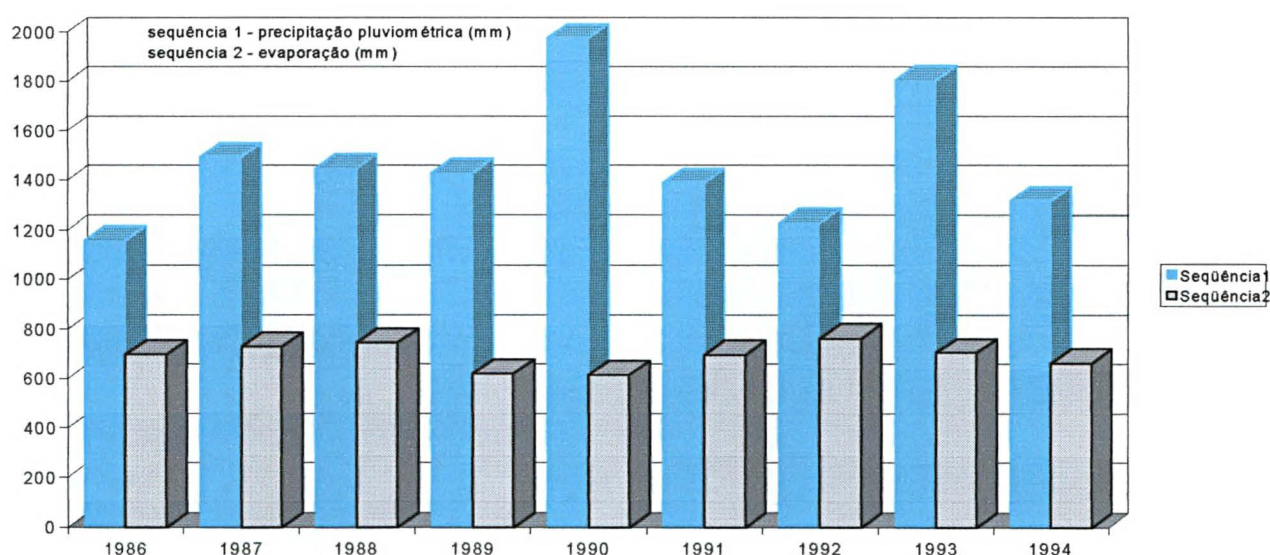


FIGURA 10. HISTOGRAMA MOSTRANDO A DIFERENÇA HÍDRICA ANUAL ENTRE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO ANUAL (estações Juquiri e F.E.F.A., período 1986 -1994).



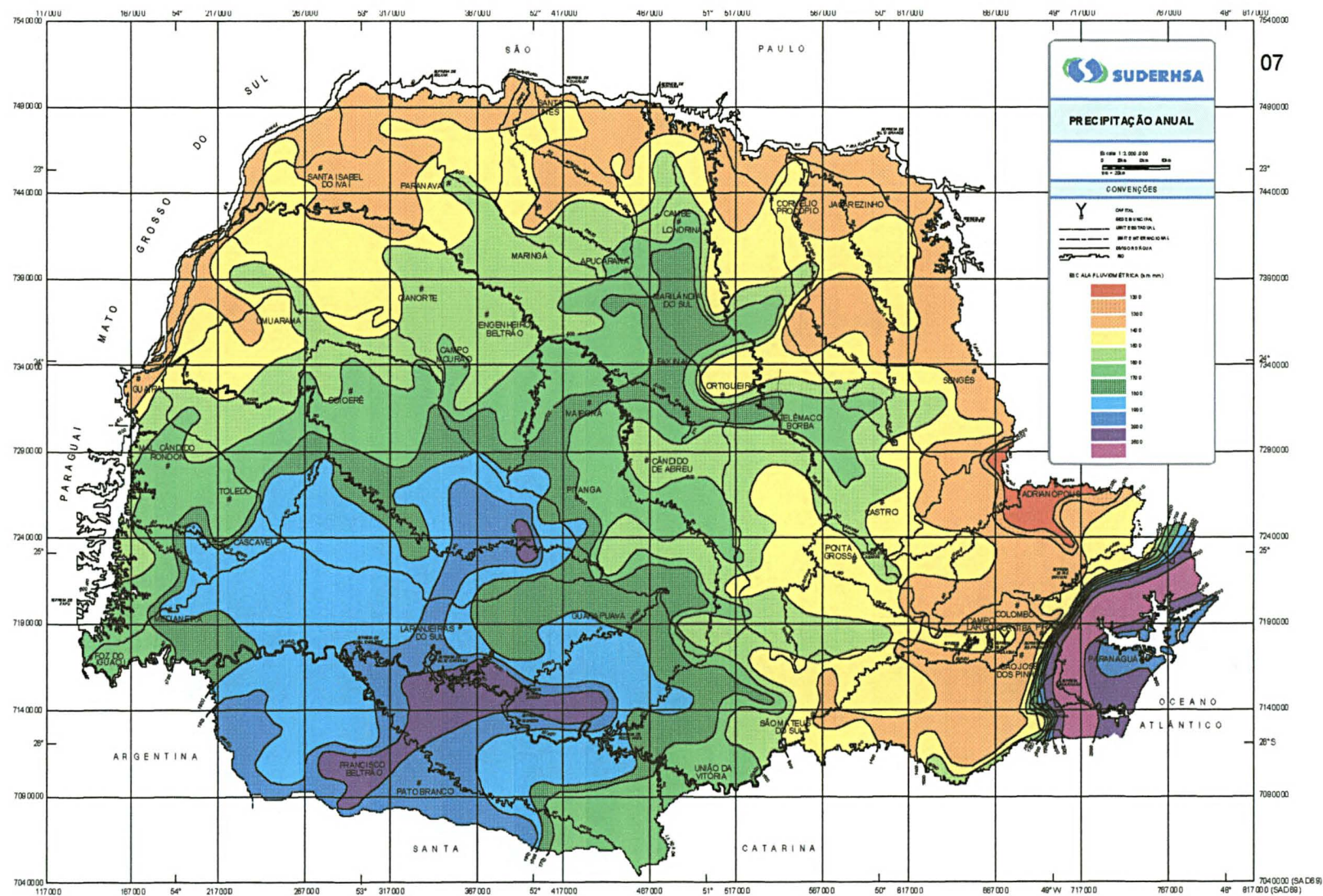


FIGURA 11. MAPA DE PRECIPITAÇÃO ANUAL DO ESTADO DO PARANÁ (fonte : Atlas Hídrico, SUDERHSA - 1997).







## **4.GEOMORFOLOGIA**

## 4 GEOMORFOLOGIA

### 4.1 GEOMORFOLOGIA REGIONAL

A modelagem da atual superfície do Estado do Paraná foi processada pelos sistemas hidrográficos, movimentos epirogênicos e tectônicos, assim como pela influência de alterações climáticas, e da diferente susceptibilidade do tipo litológico ao intemperismo químico, no caso do Primeiro Planalto Paranaense. Os sistemas hidrográficos e as linhas orográficas principais limitam as paisagens naturais.

O território Paranaense, se apresenta como típica paisagem de degraus estruturais ou escarpa de extratos, distinguindo-se cinco grandes regiões de paisagens naturais : o litoral, a Serra do Mar e três Planaltos (primeiro, segundo e terceiro), que se inclinam suavemente para W.NW e SW (MAACK, 1968).

No contexto da presente dissertação, restringimos a abordagem regional ao Primeiro Planalto Paranaense.

O primeiro planalto apresenta uma característica de heterogeneidade em sua extensão. Subdivide-se em três sub-regiões : o Planalto de Curitiba (Foto 8), a zona Montanhosa do Açungui (Foto 9) e o Planalto do Maracanã (MAACK, 1968).

Os divisores de água que delimitam as bacias do Iguaçu e Ribeira são constituídos de rochas pré-cambrianas e parametamórficas, com intrusões de granitos e diabásios (Figura 13). O relevo torna-se mais movimentado, com vales profundos e espigões alongados, com aspecto geral de relevo montanhoso de tipo Apalacheano, a partir da linha de contato entre o Complexo Gnaíssico-Migmatítico com as rochas metamórficas do Grupo Açungui. Tais características acentuam-se ainda nos domínios da bacia do Ribeira, constituindo a zona montanhosa do Açungui.

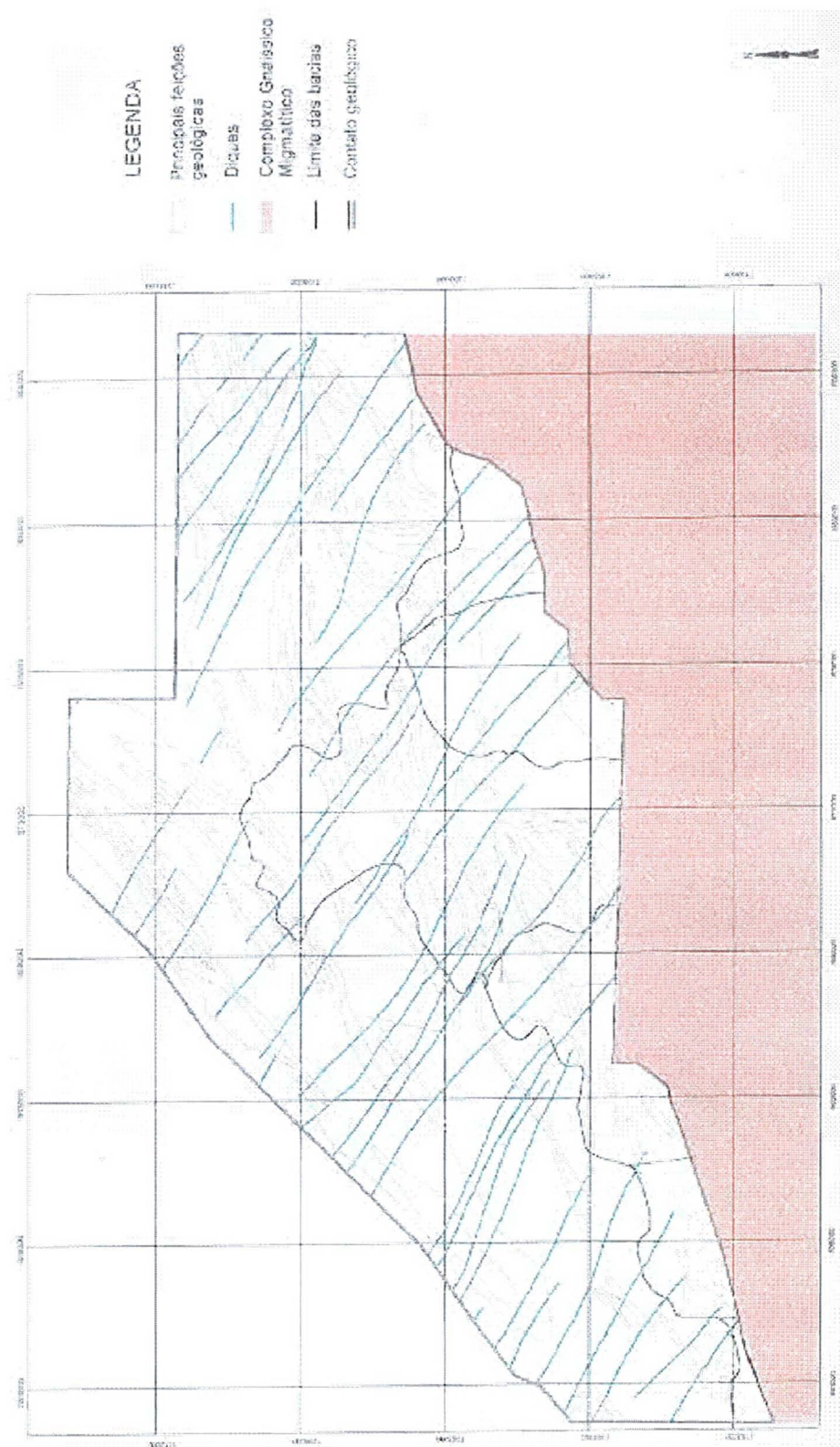


FIGURA 13. MAPA GEOLÓGICO COM DIVISORES DE BACIA.



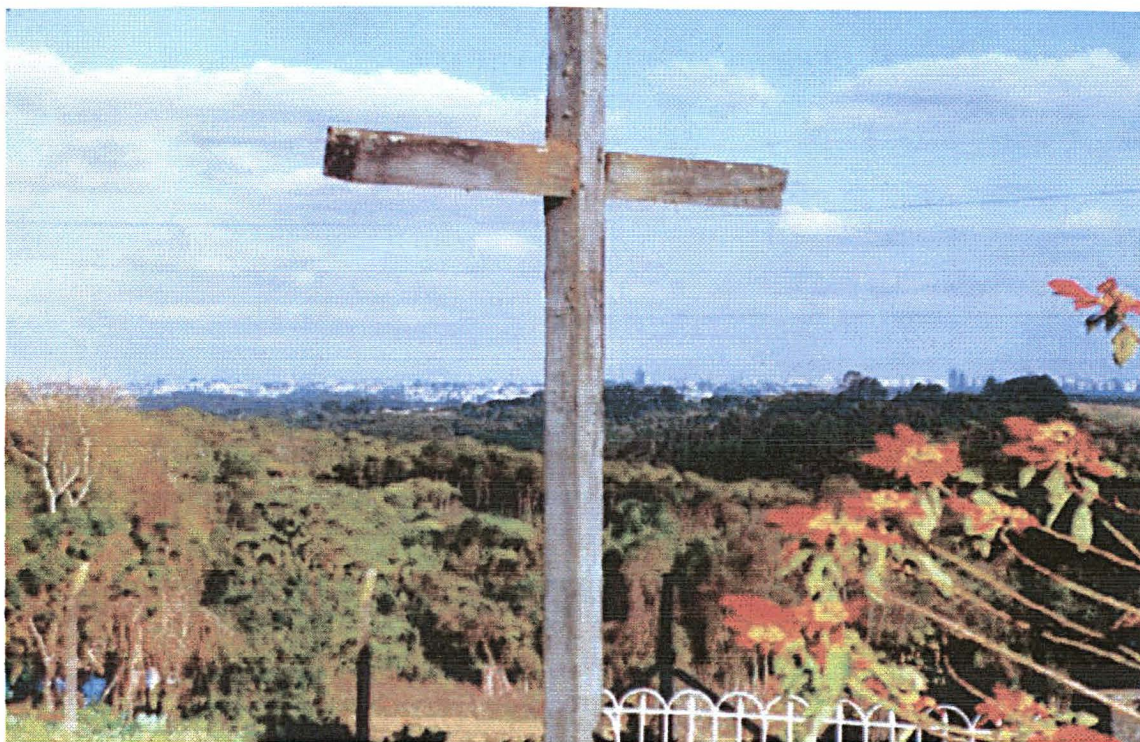


FOTO 8. VISTA DO PLANALTO DE CURITIBA COM A CIDADE DE CURITIBA AO FUNDO.



FOTO 9. ZONA MONTANHOSA DO AÇUNGUI - VISTA COM ASPECTO GERAL DE RELEVO MONTANHOSO E ESPIGÕES ALONGADOS.

A sul desta linha de contato entre o Complexo Gnaíssico-Migmático e o Grupo Açungui, o relevo apresenta maior homogeneidade, com grandes extensões planas, correspondentes as várzeas do rio Iguaçu e seus afluentes, tornando-se ondulado em direção norte, tanto mais intenso, quanto mais próximo do contato litológico referido, constituindo esta região o Planalto de Curitiba propriamente dito.

O relevo ondulado reflete a atuação dos agentes morfogenéticos sobre o substrato Migmatítico e os capeamentos argilo-arenosos pleistocênicos da Fm Guabirotuba, predominantes nesta região, correspondendo a 46% da área da RMC.

O Planalto de Maracanã se estende a oeste da escarpa Devoniana, entre Piraí do Sul e Castro, com terras planas e alagadiças, é uma zona isolada e de maior resistência, constituída por quartzito (serra do Piraí) e morros abaulados de quartzo-pórfiro decomposto, sendo atravessado pelo rio Iapó.

BARTHELMES (1964), subdividiu o Primeiro Planalto Paranaense em sub-região do Alto Iguaçu, sub-região do Alto Ribeira e sub-região do Alto Iapó. Justifica esta subdivisão em função da estrutura dômica do Primeiro Planalto, que origina um padrão radial geral de drenagem, gerando um conflito das altas bacias decorrente da ingressão de ciclos de erosão, a partir de níveis de base diferentes.

#### 4.2 GEMORFOLOGIA LOCAL

A área está inserida no compartimento paisagístico regional conhecido como Primeiro Planalto Paranaense, mais especificamente na sub-região da zona Montanhosa do Açungui, conforme Maack (1968).

Segundo Bigarella e Salamuni (1958**"b"**), os aspectos fisiográficos desta região apresentam-se subordinados “às estruturas e às litologias do Grupo Açungui, que se tornam absolutamente imprescindíveis uma compreensão razoável da geologia regional para interpretação das formas de superfície”.



Hasui e Almeida (1978), apontam que as características morfológicas da região devem ser analisadas levando-se em conta a ação tectônica terciária e modelado no quaternário. Salamuni (1981), acrescenta que os processos climáticos, também exercem papel importante como agentes catalisadores dos fenômenos erosivos e deposicionais.

Quanto ao aspecto morfológico, a zona Montanhosa do Açungui, apresenta relevo enérgico, onde dominam os cabeços de estratos (*hogs backs*) e espigões, separados por pequenas planícies e vales alongados, com desenvolvimento preferencial, segundo a



direção NE-SW, ilustrado na Foto 10.

#### FOTO 10. VISTA DO RELEVO ENÉRGICO, SEGUNDO A DIREÇÃO NE- SW.

A energia de relevo é caracterizada por um desnível médio de 80 metros, atingindo um máximo 200 metros, nas proximidades dos vales mais entalhados.

O relevo positivo de cabeços de estratos e espigões é predominantemente originado por quartzitos e filitos intercalados, enquanto as pequenas planícies deprimidas e vales alongados correspondem a áreas com predominância dos mármore.

Os diques de diabásio, apresentam comportamento diferenciado em relação às encaixantes, exprimindo-se como vales, ao seccionar as cristas de filitos e quartzitos, havendo no entanto inversão para cristas alongadas na direção NW-SE, em seu desenvolvimento nas rochas carbonatadas.

O contexto morfológico assim delineado, condiciona uma compartimentação onde verifica-se um padrão reticulado losangular, com relevo positivo linear nas direções NW-SE e NE-SW, modificando-se para um relevo negativo, nas áreas interiores a estes. A repetição, de forma homogênea e constante, das direções acima comentadas, corresponde ao padrão principal de evolução do aparelho cárstico na região.

Cada losango constitui uma unidade com características similares às demais, porém com comportamento independente, do ponto de vista hídrico, refletindo as direções estruturais mais freqüentes da área conforme anteriormente comentado.

A exposição dos pacotes carbonáticos, intensamente fraturados em função dos múltiplos eventos desenvolvidos na evolução geotectônica do grupo Açungui, a um clima úmido, estabelecido a partir do período Quaternário, ocasionou nos mesmos significativos processos de dissolução. Tais processos aliados aos processos erosivos, diferenciam de forma drástica o relevo, em comparação às demais sub-regiões do Primeiro Planalto Paranaense.

Por outro lado, a ampliação acentuada do intemperismo químico, pela susceptibilidade à dissolução apresentada pelos mármore, corresponde a uma evolução rápida das formas, incrementando a energia de relevo e originando a instabilidade geotécnica da região, a ser abordada de forma mais detalhada na seqüência.

OKA FIORI (1987) fez uma análise das vertentes na região do médio Iguaçu, calculando ângulos característicos, ângulos médios, comprimento e curvatura das

vertentes visando analisar as formas de vertentes dominantes, em sua relação com os diferentes tipos litológicos da área.

Complementando o quadro morfológico da região, na área de abrangência dos mármores, temos o desenvolvimento das formas cársticas correspondendo a feições de absorção do aparelho cárstico (ver Figura 14).

Em terrenos cársticos, no caso de rochas carbonáticas muito compactas ou metamorfasadas, as formas de absorção da entrada (precipitação) do sistema hidrogeológico são representadas, principalmente, pelas interseções de descontinuidades tectônicas (juntas e falhas) e pelas formas topográficas cársticas desenvolvidas pela ação da água. Ford & Williams (1985) designam de cársticas, além das feições formadas pelos processos de dissolução (químicos), aquelas geradas por processos de abatimentos (físicos).

Segundo Lladó (1970), as formas cársticas de absorção podem ser classificadas em abertas e fechadas. As formas abertas, entre elas os sumidouros, permitem uma penetração rápida e livre da água para o interior do sistema. Já as formas fechadas, com destaque para as dolinas, uvalas, poliés e vales cegos, apresentam uma absorção lenta da água.

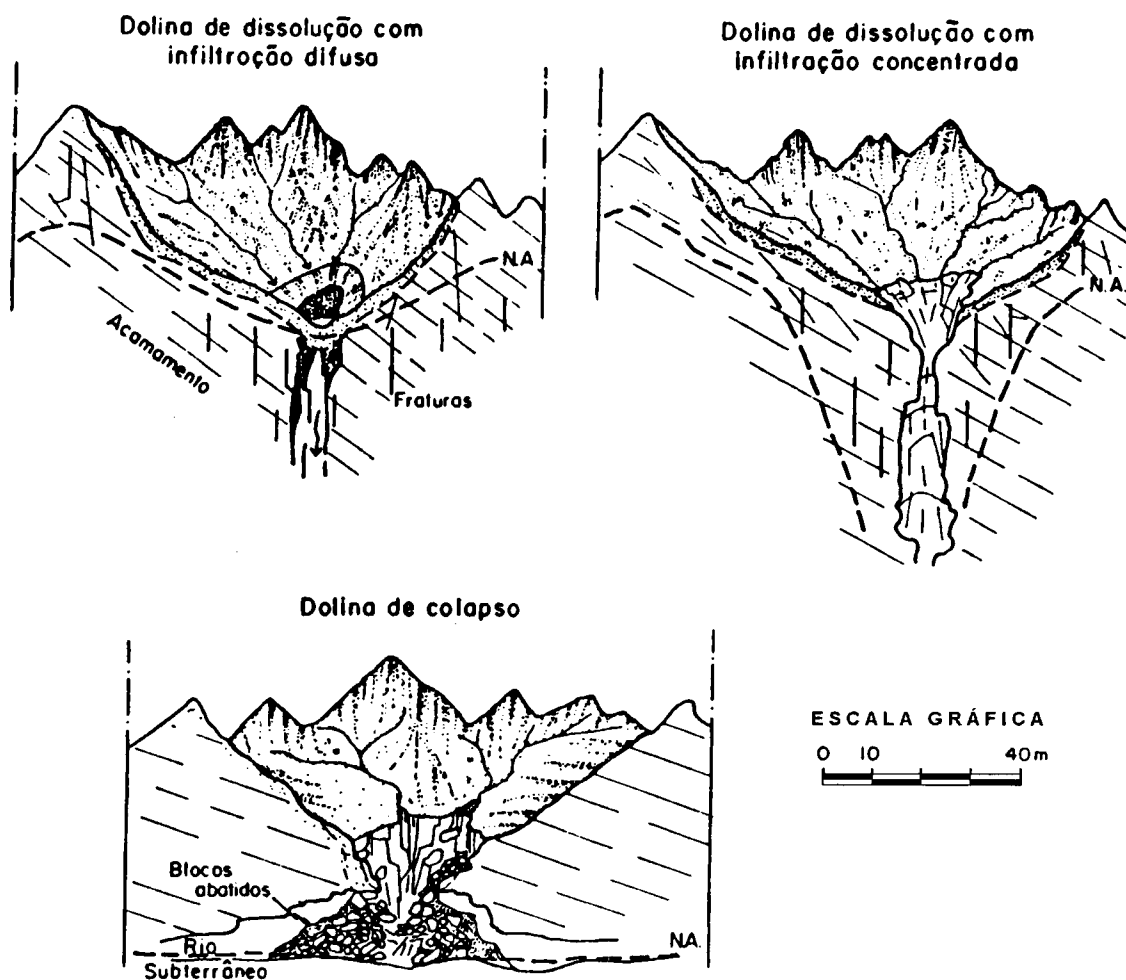


FIGURA 14. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS TIPOS FUNDAMENTAIS DE FORMAS DE ABSORÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM FUNDOS DE DEPRESSÕES POLIGONAIS NO SISTEMA CÁRSTICO DO ALTO RIBEIRA (Karmann, 1994).

Segundo Kohler (1989), na formação do modelado cárstico os processos químicos de corrosão interagem com os processos físicos de abatimento. Portanto, uma dolina de dissolução pode sofrer um abatimento, bem como uma dolina de colapso pode ter suas bordas suavizadas pelos processos de corrosão.

A coalescência de dolinas gera as uvalas que se destacam por apresentarem formas alongadas. Em alguns casos, são formadas planícies cársticas (poliés), que são depressões maiores do que as dolinas e uvalas. Nesses poliés, que estão próximos às



zonas de contato com a cristas filíticas e quartzíticas ou com as próprias encostas íngremes carbonáticas, estão presentes fontes e drenagens de pequeno porte (às vezes intermitentes).

Na área em estudo, a presença de metadolomitos intercalados a quartzitos e filitos propiciou o desenvolvimento de formas cársticas, como dolinas e sumidouros, ao longo de zonas deprimidas no terreno correspondentes aos metadolomitos (ilustrados nas Fotos n<sup>os</sup> 11, 12 e 13).



FOTO 11. DOLINA TÍPICA COM SATURAÇÃO EM ÁGUA (Almirante Tamandaré/ São Miguel).





FOTO 12. SUMIDOURO EM PAISAGEM DOLINIFORME - IDENTIFICANDO SECAMENTO DA VEGETAÇÃO POR AUSÊNCIA DE ÁGUA (Almirante



Tamandaré/São Miguel).

FOTO 13. VISTA DE "CAMPO DE DOLINAS" ( Almirante Tamandaré/São Miguel).

## **5.HIDROGRAFIA**

## 5 HIDROGRAFIA

### 5.1 ASPECTOS REGIONAIS

O sistema hidrográfico do Estado do Paraná, acha-se dividido em dois grupos nitidamente distintos, diferenciados pela orientação e forma de deságua de seus componentes. O principal responsável por tal aspecto característico deste sistema fluvial, é a Serra do Mar, que atua como divisor d'água.

Segundo este ponto de vista, o aquífero está situado numa área abrangida por duas bacias, Bacia do Iguaçu e Bacia do Ribeira. Estas duas bacias por sua vez, fazem parte de duas unidades maiores, a nível de compartimentação regional, representadas pela bacia do Prata e bacia Litorânea, respectivamente. Apesar de considerar-se a bacia hidrográfica como unidade básica para os estudos hídricos, impõe-se o aprimoramento conceitual deste modelo, através de compartimentação do meio físico, segundo critérios geológicos, os quais identificam com maior fidelidade situações hídricas próprias e distintas entre si, dentro de uma mesma bacia.

As unidades geológicas, em sua maior parte, não obedecem os limites da unidade bacia hídrica, condicionando, portanto comportamento hídrico idênticos em de bacia diferentes.

### 5.2 HIDROGRAFIA NA RMC

O limite sul do aquífero é materializado pela linha de contato, de direção aproximada NE-SW, do complexo metamórfico com o embasamento cristalino. Pela ausência neste último de massas carbonáticas solúveis, hidraulicamente comportando-se como uma grande barreira impermeável, com pontos de conexão esporádicos, condicionados à presença de alinhamentos estruturais (falhas e diques de diabásio).

Em sentido perpendicular a esta linha limítrofe, estabelece um perfil, que varia em altitudes de 1.100 a 940 metros, correspondendo as altitudes mínimas à interseção da

mesma com o fundo dos vales da afluição Norte do rio Iguaçu (rios Itaquí, Verde, Passaúna, Barigüi, Atuba, Palmital), sendo, portanto esta a altitude do **Nível de Base do aquífero na bacia do Iguaçu**. Em termos figurativos, a **altitude 940 m**, corresponderia à cota de topo do vertedouro da grande barragem constituída pelas rochas silicatadas do Complexo Gnaissico-Migmatítico.

A descarga de base do aquífero para a bacia do Iguaçu, de uma forma geral, esta limitada à curva de nível 940 m. Em pontos isolados podem ocorrer fugas à altitudes menores, relacionadas aos elementos estruturais acima comentados, porém com vazões pouco significativas. O limite inferior de 850 m, representando a altitude média da calha do altíssimo Iguaçu, corresponderia *ao filtro de pé da grande barragem*.

O comportamento da descarga de base, considerando a bacia do Ribeira, esta condicionado por níveis de base escalonados. Tal escalonamento se faz a partir da altitude 1200 m, correspondendo aos topos da linha do interflúvio com a bacia do Iguaçu e pela foz do rio Ribeira com o oceano Atlântico, no Estado de São Paulo, respectivamente.

O condicionamento delineado, é confirmado pelos valores de descarga de base da afluição Norte do rio Iguaçu, onde da cabeceira até a linha de contato dos compartimentos geológicos, verifica-se uma descarga de base por área de bacia de 6,5 l/s/km<sup>2</sup>, passando a sul da mesma para 3,5 l/s/km<sup>2</sup>.



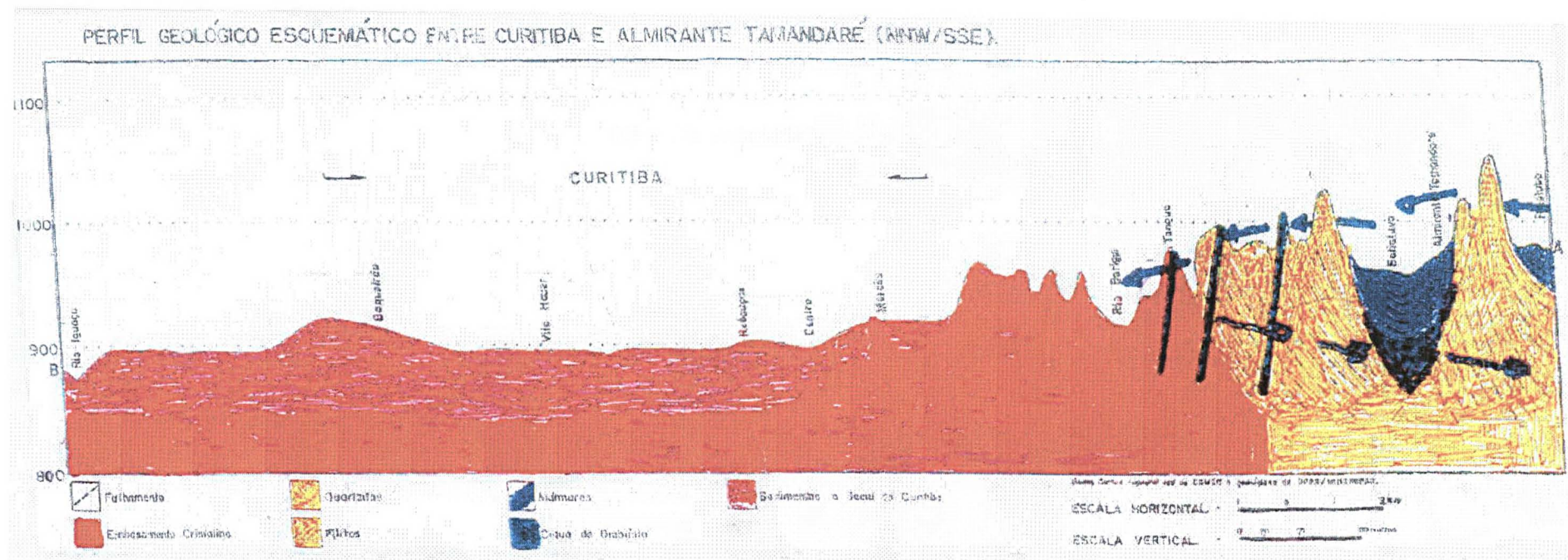


FIGURA 15. PERFIL GEOLÓGICO ESQUEMÁTICO CURITIBA - ALMIRANTE TAMANDARÉ.

Esta constatação, identifica claramente, uma diferença de armazenamento em subsuperfície, onde a grande porosidade e permeabilidade do aquífero cárstico reflete-se como descarga de base superior à descarga ao sul da linha de contato, todas elas dentro de uma mesma bacia.

A bacia do Ribeira, por desenvolver-se praticamente sobre uma mesma unidade geológica (complexo Metamórfico), com grande capacidade de armazenamento em subsuperfície, acrescida pela descarga profunda, proveniente da bacia do Iguaçu, apresenta descargas de base entorno de  $9 \text{ l/s/km}^2$ , caracterizando assim, a sua excelente vocação no que tange ao aproveitamento dos recursos hídricos.



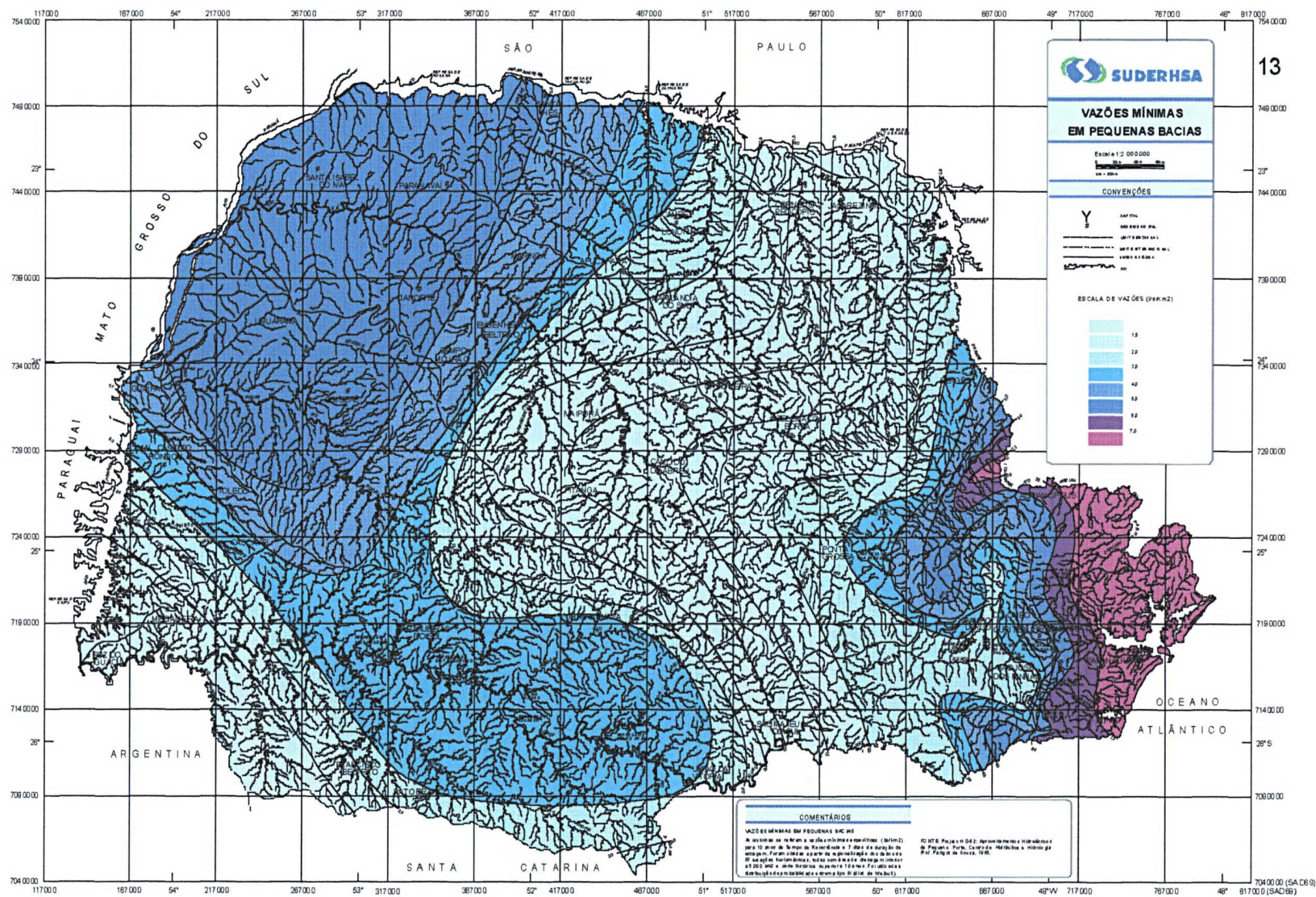


FIGURA 16. MAPA DE VAZÕES MÍNIMAS EM PEQUENAS BACIAS DO ESTADO DO PARANÁ (fonte: Atlas Hídrico - SUDERHSA, 1997).

**6.GEOLOGIA**

## 6 GEOLOGIA

A região estudada no que se refere ao contexto geológico regional, está inserida no Leste paranaense, abrangendo a porção sul do Cinturão Ribeira (CORDANI & BRITO NEVES, 1982) ou o segmento sul-sudeste brasileiro da Faixa Dobrada Apiaí (HASUI *et alii*, 1975), apresentado na Figura 17.

O Cinturão Ribeira, no Paraná, caracteriza-se por um conjunto de rochas, com idades desde o Arqueano até o Cenozóico. As rochas arqueanas estão representadas pelo Complexo Gnaíssico-Migmatítico enquanto os Complexos Pré-Setuva e Setuva estão enquadrados no Proterozóico Inferior a Médio. O Grupo Açungui pertence ao Proterozóico Superior e uma série de intrusões Graníticas têm idades correspondentes ao Proterozóico e Eopaleozóico. Todas estas rochas estão seccionadas por um espetacular enxame de diques básicos Mesozóicos da Formação Serra Geral. Sedimentos Pleistocenos da Fm Guabirotuba, e sedimentos Cenozóicos inconsolidados recobrem localmente as unidades antes citadas.

### 6.1 PRINCIPAIS UNIDADES GEOLÓGICAS NA ÁREA DE ESTUDO

#### 6.1.1 Complexo Gnaíssico-Migmatítico

O Complexo Gnaíssico-Migmatítico, também denominado de Complexo Costeiro, estende-se ao longo de uma faixa com direção NE, ao sul da região em estudo. De acordo com MELO *et alii* (1980), essa faixa de rochas gnaíssico-migmatíticas situa-se entre as rochas do Grupo Setuva e Grupo Açungui a noroeste (com as quais o contato é por falha e, em parte, concordante) e os maciços graníticos da Serra do Mar a sudeste (com os quais o contato é discordante e por falhas). As rochas deste complexo apresentam granulação média a grosseira, com alternância de bandas escuras e claras, textura

granolepidoblástica e xenoblástica, constituídas mineralogicamente por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, biotita, hornblenda e por diopsídio e granadas.

#### 6.1.2 Grupo Açungui

Historicamente, os metassedimentos do Grupo Açungui foram designados como “Série Assunguy” por OLIVEIRA (1927). BIGARELLA & SALAMUNI (1956, 1958 a,b) subdividiram a série em formações Setuva, Capiu e Votuverava, da base para o topo. ALMEIDA (1956) definiu a Formação Itaiacoca, sendo esta correlacionada à Formação Capiu por BIGARELLA & SALAMUNI (1958a) e MARINI *et alii* (1967). Contudo os estromatólitos descritos nas duas formações apresentam diferenças (FAIRCHILD, 1982), sugerindo a manutenção das mesmas como unidades independentes. MARINI *et alii* (1967) elevou a série à categoria de grupo. MARINI (1970) e FUCK *et alii* (1971) posicionaram a Formação Setuva em um nível estratigráfico inferior ao do Grupo Açungui. Dessa forma, o referido grupo ficou subdividido em formações Capiu, Itaiacoca e Votuverava.

Em trabalho posterior, SOARES (1987) referiu-se ao Grupo Açungui como Complexo Votuverava-Itaiacoca-Capiu, subdividindo-o em associações litológicas dispostas nos sinclínios Capiu (metareno-pelito, metapelito dolomítico, metapelito), Votuverava (metarenito grosseiro, metacalcário, metarenito, metadolomito, metarritmito) e Itaiacoca (metapelito, metacalcário dolomítico, metavulcânica, metarenito feldspático).

FIORI (1990, 1992), além de denominar de “formação” a Seqüência Antinha (DIAS & SALAZAR JR, 1987), colocando-a em posição estratigráfica superior às formações Capiu, Votuverava e Itaiacoca, subdividiu o Grupo Açungui em seqüências dispostas em três blocos tectônicos (blocos C, D e E).



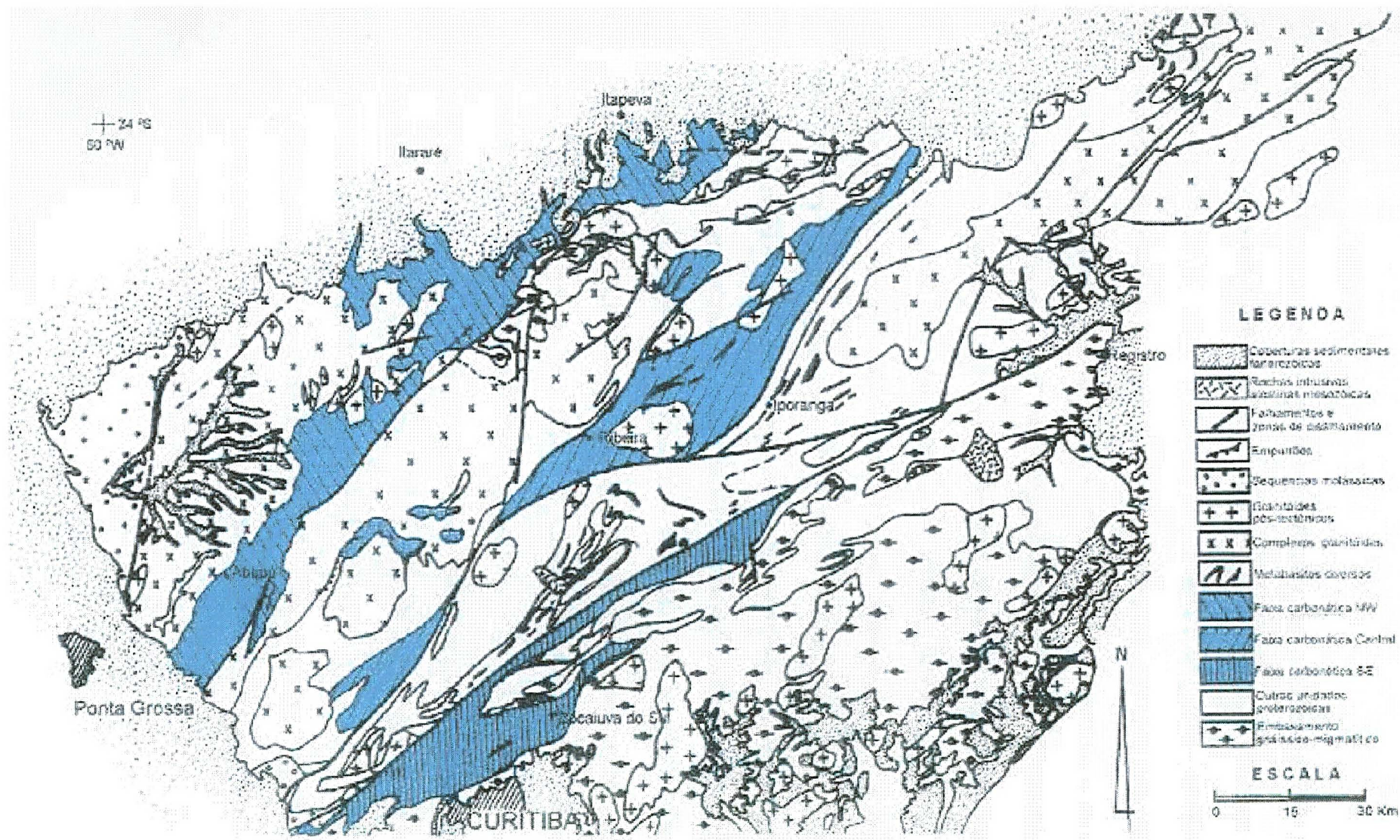


FIGURA 17. MAPA GEOLÓGICO COM REALCE DE FAIXAS CARBONÁTICAS.



Posteriormente, estas mesmas seqüências foram designadas de conjuntos litológicos (FIORI & GASPAR, 1993), com a seguinte distribuição :

- no bloco C estão presentes os conjuntos Vuturuvu (metarritmitos arenosos, níveis de metaconglomerados, metassiltitos, quartzitos e metargilitos), Capivara (metacalcários calcíticos, geralmente rítmicos e de coloração cinza-escuro) e Tacaniça (metarritmitos silticos cinza, com intercalações de metassiltitos arenosos e metarritmitos siltico-arenosos, metarenitos e metaconglomerados), todos relacionados à Formação Antinha;

- no bloco D, estão presentes os conjuntos Saivá (filitos, metarritmitos, mármores e metamargas), Coloninha (metarenitos, metassiltitos, metarritmitos e metaconglomerados) e Bromado (filitos, quartzitos e metaconglomerados polimíticos), correlacionados à Formação Votuverava ;

- no bloco E, ocorrem os conjuntos Morro Grande (alternância de bancos ou camadas de quartzitos, filitos e mármores), Rio Branco (mármores e/ou metacalcários e suas intercalações de filitos e quartzitos) e Juruqui (filitos avermelhados, com intercalações de filitos e quartzitos), associados à Formação Capiuru.

Os eventos deformacionais citados anteriormente podem ser correlacionados ao Sistema de Cavalgamento Açungui, Sistema de Dobramento Apiaí e Sistema Transcorrente da Lancinha, descritos por FIORI (1990).

Os metassedimentos e metavulcânicas do Grupo Açungui apresentam uma tectônica deformadora caracterizada por um sistema de cavalgamento, grandes dobramentos e falhas transcorrentes.

### 6.1.3 Formação Capiu

A Formação Capiu aflora na porção sudeste do Grupo Açungui e é composta, predominantemente, por metadolomitos, filitos e quartzitos e, secundariamente, por filitos grafitosos, metassiltitos e metamargas. Os quartzitos apresentam-se em camadas métricas com gradações para filitos e às vezes para filitos carbonosos, podendo formar lentes intercaladas nos pacotes de metadolomitos e de filitos. As rochas metacarbonáticas ocorrem em espessos corpos lenticulares e são geralmente maciças, às vezes silicosas, pouco deformadas internamente e com estruturas estromatolíticas originadas por algas do gênero *Collenia* (descritas por BIGARELLA & SALAMUNI, 1958a; FAIRCHILD, 1982). Os filitos e outros sedimentos siltico-argilosos distribuem-se em pacotes espessos, contendo às vezes, camadas finas de hematita e/ou grafita e também estruturas sedimentares preservadas (estratificação cruzada, marcas onduladas, acamamento gradacional).

Na Formação Capiu, os litotipos apresentam-se em sua maioria lenticularizados, devido a deformações impostas sob cisalhamento dúctil-rúptil, de baixo ângulo, contínua e homogênea nas litologias siltico-argilosas, com neocrystalização, principalmente de sericita e clorita. Nos outros tipos rochosos, essa deformação foi descontínua e heterogênea, apresentando preservação de estruturas sedimentares mecânicas e organógenas em locais pouco deformados. O metamorfismo regional associado é de fácies xisto verde, zona da clorita a início da zona da biotita, com presença de paragêneses indicando temperaturas de até 450°C e pressões de até 4 kbar. O evento tectônico posterior ocasionou uma deformação rúptil-dúctil descontínua compressiva (dobramento vertical associado), em condições máximas de fácies xisto verde, zona da clorita, sendo a

Falha da Lancinha a principal estrutura formada. Como último evento, ocorre uma deformação descontínua, distensional, sem metamorfismo associado (SOARES, 1987).

A foliação principal, predominantemente desenvolvida nos metassiltitos e filitos, apresenta-se geralmente paralela ou subparalela a níveis de diferente composição, interpretados como acamamento sedimentar. Essa foliação, relacionada a uma tectônica de cavalgamento, sofreu deformação por dobramento heterogêneo. Como resultado, ocorreu a geração de uma segunda foliação (clivagem de crenulação), não havendo, na maior parte das rochas, cristalização e/ou recristalização de minerais (REIS NETO & SOARES, 1987).

Os principais conjuntos litológicos da Formação Capiçu, separados por falhas de cavalgamento e expostos em sinformes e antiformes com eixos na direção NE-SW. O contato desses conjuntos com seu embasamento é caracterizado por uma extensa faixa de milonitos e cataclasitos.

#### 6.1.4 Formação Serra Geral (Intrusivas Básicas)

Um conjunto de rochas de fundamental importância para este estudo é o enxame de diques básicos, derivados das atividades tectono-magmáticas registradas no Mesozóico, ilustrados pelas Fotos n<sup>os</sup> 14 e 15.

O Arco de Ponta Grossa é um dos elementos geotectônicos de maior relevância da bacia do Paraná. Representa um ponto quente do manto, principal área-fonte do evento magmático, tratando-se de uma estrutura marginal, transversal a bacia, cujo eixo dirige-se para o seu interior.



FOTO 14. DIQUE DE DIABÁSIO DE COLORAÇÃO ESCURA, AFLORAMENTO DE ROCHA INALTERADA. (Almirante Tamandaré/São Miguel).

Segundo VIEIRA(1973), os grande lineamentos e falhamentos associados a esta estrutura, se desenvolveram em uma única fase tectônica, desencadeada nos primórdios do Cretáceo, com constância direcional noroeste e constituem extensas zonas de falhas normais, cuja reativação no Mesozóico deu acesso ao magma basáltico sob a forma de diques sills e derrames.

Esses diques ocorrem seccionando todas as litologias pré-existentes e concentram-se principalmente em direção paralela ao eixo do Arco de Ponta Grossa. Estão alojados em falhas e fraturas de tração, segundo a direção geral N50-60°W. Distribuem-se em toda a área como rochas intrusivas ao longo de fraturas, com espessuras variando de 20 m a 80 m, e desenvolvimento subvertical em profundidade, que varia de metros a quilômetros.





FOTO 15. DIQUE DE DIABÁSIO, DETALHE DO AFLORAMENTO (Almirante Tamandaré / São Miguel )

Os diques são predominantemente por diabásios e dioritos, de coloração cinza escura a preta, apresentando granulação fina a grossa, textura ofítica e estrutura maciça. A mineralogia é formada por plagioclásio (variando de andesina cálcica a labradorita sódica), piroxênio (augita e pigeonita) e, como acessórios, magnetita, ilmenita, clorita, quartzo e sericita. Como feições de alteração é



comum a ocorrência de blocos arredondados em meio ao solo, muitas vezes com decomposição esferoidal.

A presença da magnetita em sua composição mineralógica, em contraste com a ausência deste mineral nas encaixantes, sugere a utilização do método magnetométrico como levantamento geofísico mais adequado para o detalhamento em situações onde os mesmos apresentam-se capeados por coberturas sedimentares quaternárias (Guabirotuba e sedimentos inconsolidados recentes).

#### 6.1.5 Formação Guabirotuba

Os sedimentos da Bacia de Curitiba, excetuando-se os depósitos aluvionares recentes, constituem a Formação Guabirotuba, a qual teria sido depositada durante o Pleistoceno Superior, num ambiente de amplos vales com canais anastomosados.

A área de abrangência da Formação Guabirotuba é de 900 km<sup>2</sup>, em sua maior parte no município de Curitiba, estendendo-se também para os demais municípios de sua região metropolitana, com espessuras máximas da ordem de 60 a 80 m na porção central da Bacia de Curitiba.

Os contornos atuais da bacia de Curitiba, apresentam um desenvolvimento assimétrico, com o bordo norte de forma retilínea, paralelo ao contato do Complexo Gnaíssico-Migmatítico com o grupo Açungui, indicando uma maior intensidade dos processos erosivos neste setor.

São sedimentos constituídos predominantemente por camadas de argilas montmoriloníticas (FORTIN, 1989), entremeadas por lentes arcólicas, eventualmente quartzosas, em discordância com as rochas do Complexo Gnaíssico-Migmatítico e com as rochas das unidades proterozóicas. Os arcólios

estão dispostos em corpos de distribuição espacial irregular sob o formato de lentes. Estas lentes possuem espessuras centimétricas a métricas e repetem-se verticalmente de maneira irregular.

Resultados de várias análises granulométricas de amostras de superfície realizadas, confirmam a predominância da fração argilosa sobre a fração arenosa.

Com referência ao material arenoso, predomina a fração grossa, na faixa de 57%, enquanto cerca de 37% apresentam diâmetro médio correspondente a areia média e apenas 6 % areia fina.

As maiores espessuras de arcóseo, e portanto as de maior interesse hidrogeológico, estão localizadas na bacia do rio Iraí, a Nordeste da Região Metropolitana de Curitiba, nas proximidades do Parque de Exposição Castelo Branco, no município de Pinhais-PR.

Na região em apreço, percebe-se através dos perfis litológicos, que as camadas arenosas intercaladas nos sedimentos pelíticos apresentam variações quanto a espessura, mas ocorrem de forma relativamente contínua. A espessura máxima da Formação Guabirota, nesta área, atinge 80 m, sendo que as camadas arenosas, depositadas na parte basal da formação, apresentam, via de regra, espessuras que variam de 4 a 18 m.

#### 6.1.6 Aluviões

O último registro geológico na área analisada refere-se a sedimentos recentes depositados ao longo das principais drenagens da região. São sedimentos areno-argilosos com intercalação de níveis conglomeráticos de seixos, inconsolidados, de espessura variável.

Os depósitos aluvionares são formados nas várzeas dos rios, principalmente do rio Barigüi. Sua ocorrência, corresponde ao de áreas abatidas

por carstificação com material aluvionar, sendo comum espessuras nestes locais de até 10 metros.

Os sedimentos depositados são de origem aluvionar e ou coluvial, capeando estruturas cársticas como dolinas e uvalas, as quais são preenchidas por material residual.

Por se situarem preferencialmente na área de planície de inundação das principais drenagens, são capeados por solo orgânico de cor escura de aspecto turfoso.

A deposição diretamente sobre as formas cársticas, possibilitando movimentação para o seu interior, bem como a presença de argilas saturadas em água pelo nível freático, tornam estas áreas altamente instáveis do ponto de vista geotécnico. Ocorrem constantes movimentações devido a oscilação do freático e conseqüente adensamento das argilas, e ou por perdas de material para o aparelho cárstico.

## 6.2 COMENTÁRIO SOBRE A EVOLUÇÃO GEOLÓGICA

No presente estudo, o Grupo Açungui (em especial a Formação Capiru) é a unidade geológica de maior interesse por estar diferenciada das demais, pela presença dos pacotes carbonáticos

A história geológica das rochas do Grupo Açungui na região em estudo, iniciou-se com a implantação da bacia Açungui sobre uma margem litosférica adelgada, resultante de um evento de estiramento litosférico continental, em torno de 1000 a 800 Ma (SOARES, 1987), no Proterozóico Superior. Constitui uma bacia marginal, do tipo retroarco, estando, originalmente, o continente a sudeste (Embasamento Cristalino) e o arco magmático (batólitos graníticos Cunhaporanga e Três Córregos) a noroeste (SOARES, 1987; FIORI, 1990).

Na porção sudeste da bacia, junto à margem continental, depositaram-se sedimentos carbonáticos (Formação Capiçu) em condições variáveis de mar raso, sujeitos à ação de ondas com freqüentes estruturas estromatolíticas algáceas, fendas de ressecamento, estratificação cruzada e níveis oolíticos e pisolíticos (FIORI, 1990).

As extensas colônias de algas marinhas (biohermas) que originaram as estruturas estromatolíticas são representantes da intensa atividade biológica nesse período, assim como o carbono orgânico que deu uma pigmentação mais escura às rochas carbonáticas.

As algas, ao realizarem o processo de fotossíntese, consumiam  $\text{CO}_2$  da água elevando o pH e ocasionando a precipitação dos carbonatos através da seguinte reação:



Os dolomitos teriam sido formados logo após a deposição, porém antes da litificação dos sedimentos carbonáticos, por processos de dolomitização. Alguns autores como MARINI (1971) admitem para essas rochas uma precipitação primária de dolomita ou uma dolomitização concomitante à sedimentação, devido a grande uniformidade de composição química e a grande espessura dos dolomitos.

As estruturas estromatolíticas algáceas, segundo MARINI & BOSIO (1969), “são características de regiões de intermaré de praias abertas onde a movimentação da água ou inibe o crescimento de ligações laterais entre as estruturas ou as remove logo após a sua formação”.

A lenta subsidência da bacia, devido às condições de grande estabilidade tectônica, propiciou a formação de espessos pacotes carbonáticos. Dessa forma,

a medida que os biohermas cresciam e subsidiam lentamente, as algas permaneciam em águas rasas, límpidas, quentes e com boa iluminação (requisito indispensável para a fotossíntese), favorecendo seu desenvolvimento.

As freqüentes intercalações de quartzitos e filitos nos metadolomitos estariam relacionadas a mudanças do nível do mar (FIORI & GASPAR, 1993), com desenvolvimento de depósitos plataformais carbonáticos em períodos de nível do mar alto e, nos períodos de nível baixo, ocorreria a progradação da sedimentação terrígena, desde uma sedimentação litorânea praial, passando pelos depósitos carbonáticos, até depósitos plataformais e bacinais pelíticos.

A presença de estruturas pisolíticas-oolíticas e de estratificação cruzada em depósitos carbonáticos não fossilíferos indica que esses depósitos poderiam ter-se formado durante os períodos de mar baixo, devido a ação mecânica de ondas sobre os biohermas ou pela autobrechação dos sedimentos por ressecamento. Os detritos originados por esses processos seriam redepositados nas imediações dos biohermas, constituindo depósitos essencialmente clásticos (FIORI & GASPAR, 1993).

O fechamento da bacia ocorreu por volta de 650-700 Ma. Inicialmente, toda a bacia foi submetida a um intenso tectonismo representado por grandes cavalgamentos, reflexo da colisão continente-arco-continente (FIORI, 1994). Depois, com a bacia retroarco já fechada, no estágio final da colisão continente-continente, para o ajuste das saliências e reentrâncias dos blocos continentais em colisão, ocorreram dobramentos, falhamentos transcorrentes e/ou rotação de blocos com movimentos horizontais nas zonas de falhas paralelas à sutura. A principal falha transcorrente é a da Lancinha, com associação de falhas sintéticas (N60°-80°E), antitéticas (N0°-20°W) e empurrões e dobras (N30°-40°E)



(SOARES, 1987). Contemporaneamente à movimentação das falhas transcorrentes houve a intrusão de corpos graníticos alojados em dobras escalonadas, com idades em torno de 550 Ma (FIORI, 1994).

Dessa forma, os sedimentos carbonáticos já litificados pela diagênese foram nesse período do final do Proterozóico ao início do Paleozóico, metamorfisados, recristalizados, dobrados e falhados. Os fraturamentos associados, principalmente, ao evento tectônico responsável pela formação da falha da Lancinha, desenvolveram algumas das direções mais significativas de geração de condutos e canais do sistema hidrogeológico cárstico.

Após essa fase de intensa atividade tectono-magmática, a região estabilizou-se no Siluriano ou no Devoniano Inferior, tornando-se uma área cratônica, recoberta pelos sedimentos da Bacia do Paraná (SOARES, 1987).

No Mesozóico, a região foi novamente afetada por fenômenos tectônicos e magmáticos, que promoveram a intrusão de um enxame de diques básicos e o soerguimento da região. Devido a esses fenômenos houve uma reativação das falhas pré-cambrianas, de direção preferencial NE e formação de outras, de direção preferencial NW.

O soerguimento tectônico registrado no Mesozóico (Cretáceo Médio) desencadeou o processo de remoção das rochas metassedimentares do Grupo Açungui na região, com a formação no Terciário (Plioceno Inferior) de um nível definido de erosão, representado pelo nivelamento de cristas quartzíticas e filíticas com cotas variando entre 1000 e 1200 m. A superfície formada por esse nivelamento foi designada por BIGARELLA et alii (1965) de Pd<sub>2</sub> ou Superfície Residual do Alto Iguaçu. Esse mesmo controle tectônico estabeleceu as grandes bacias hidrográficas, Atlântica e Paraná, que drenam a região. A primeira é

caracterizada pelo rio Ribeira de Iguaçu e seus afluentes e a segunda pelo rio Iguaçu e seus afluentes.

Os sistemas fluviais da bacia Atlântica são geologicamente recentes, contrastando com os rios da bacia do Paraná, geologicamente mais antigos. Devido a proximidade do oceano como nível de base de erosão, o rio Ribeira e seus afluentes entalharam profundamente a região montanhosa da parte norte do primeiro planalto, em consequência de sua força de erosão (MAACK, 1968).

A capacidade de entalhamento do Ribeira, promovendo uma construção de relevo acelerada, pode ser melhor entendida, na medida que associamos aos processos erosivos o consumo das massas carbonáticas (mármore do Grupo Açungui) através da dissolução, e consequente incremento do grau de degradação.

No Quaternário, a região foi afetada por movimentos verticais em função de compensações isostáticas. Nos metadolomitos e metacalcários da área em estudo, o desenvolvimento da paisagem fluvial permitiu a implantação da fase de iniciação da formação de canais e cavernas.

A sub-região Montanhosa do Açungui, apesar de apresentar-se com menor energia de relevo, se estende pela bacia do Iguaçu na afluência norte, até a linha de contato com o complexo Gnaíssico-Migmatítico, demonstrando uma correlação nítida entre litologia e modelado do relevo.

A assimetria, do bordo norte da bacia de Curitiba, e a existência de afloramentos isolados desta formação sobre o Grupo Açungui (especialmente no município de Campo Largo), sugere a ampliação de sua área de abrangência, durante o Quaternário até o limite norte da afluência do rio Iguaçu.

Tal evidência, assume papel significativo, na evolução histórica dos processos de carstificação nesta área, indicando seu início após a remoção destes sedimentos por processos erosivos. A ausência desta cobertura sedimentar sobre a bacia do Ribeira, ampliando o período de atuação dos processos da carstificação, justifica o seu maior desenvolvimento, denotado pelo entalhamento intenso da drenagem e pela maior energia de relevo.

## **7. CONDICIONAMENTO DOS ELEMENTOS COMPARTIMENTAIS**

## 7 CONDICIONAMENTO DOS ELEMENTOS COMPARTIMENTAIS

### 7.1 CONDICIONAMENTO MORFOLÓGICO

Na área em estudo, individualiza-se o compartimento unitário ou tanque, apresentado na Figura 18, através do intercruzamento de duas cristas compostas por diques de diabásio com duas cristas de composição quartzítico-filíticas, resultando em uma figura geométrica de aspecto losangular cujas limitantes serão daqui por diante designadas por Crista de composição diabásica Sudoeste (CdbSW), Crista de composição diabásica Nordeste (CdbNE), Crista de composição quartzítico-filíticas Noroeste (CqfNW) e Crista de composição quartzítico-filíticas Sudeste (CqfSE), respectivamente.

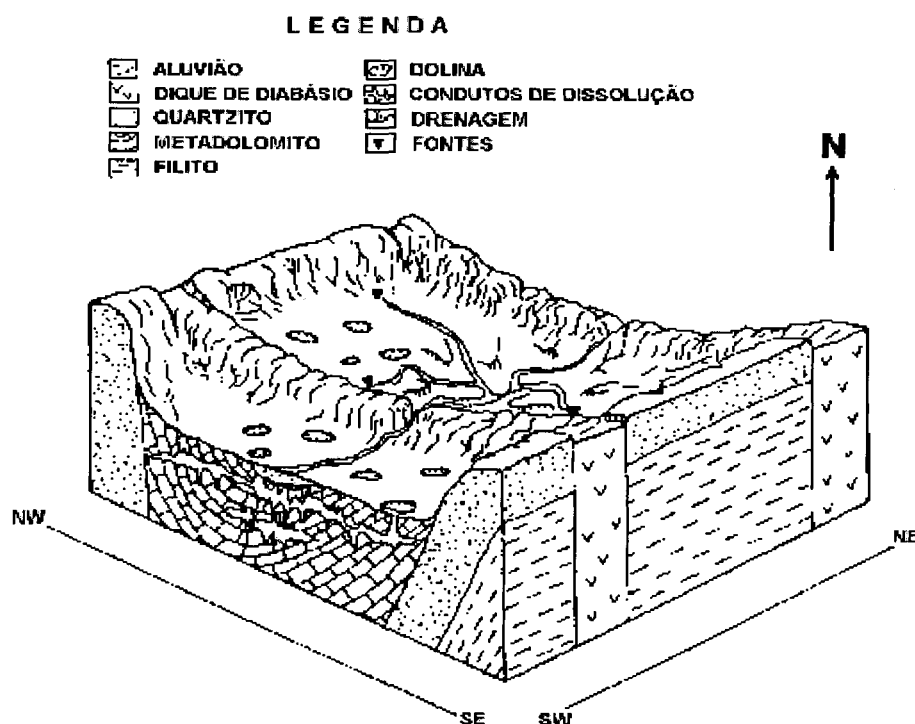


FIGURA 18. MODELO TRIDIMENSIONAL REPRESENTANDO COMPARTIMENTO UNITÁRIO.

A CdbSW é composta por um dique de diabásio com espessura de 200 metros e desenvolvimento subvertical em relação à superfície. Em sua linha de crista apresenta altitude máxima de 1030 metros, com desenvolvimento



longitudinal de dezenas de quilômetros, seccionando na direção sudeste as rochas do Complexo Gnaíssico-Migmatítico. Sua extensão delimitada entre as cristas quartzo filíticas é de 3.000 metros. A ruptura pela drenagem afluyente do Passaúna da CdbSW se faz a uma altitude de 950 metros. A CdbNE é composta por um dique de diabásio com espessura de 80 metros e desenvolvimento também subvertical, em relação à superfície. Em sua linha de crista apresenta altitude máxima de 987 metros, com desenvolvimento longitudinal de quilômetros, seccionando na direção sudeste as rochas do Complexo Gnaíssico-Migmatítico.

Sua extensão delimitada entre as cristas quartzo filíticas a exemplo da anterior é de 3.000 metros. A ruptura pela drenagem afluyente do Barigüi da CdbNE se faz à uma altitude de 950 metros. Os diques de diabásio da região de estudo podem ser vistos nas Fotos 16, 17 e 18.



FOTO 16. VISTA DO DIQUE DE DIABÁSIO QUE COMPÕE A CdbSW, FOTO TIRADA A PARTIR DO CdbNE. (Almirante Tamandaré /São Miguel)





FOTO17. VISTA DO DIQUE DE DIABÁSIO QUE COMPÕE A CdbNE FOTO TIRADA A PARTIR DA CdbSW. (Almirante Tamandaré / São Miguel)



FOTO 18. VISTA DOS DIQUES DE DIABÁSIO QUE COMPÕE A CdbSW AO FUNDO E DO CdbNE EM PRIMEIRO PLANO. (Almirante Tamandaré /São Miguel)



A CqfNW é composta na linha de crista por quartzito (ver Foto 19), com espessura 100 metros e nos flancos por filito com espessura de 400 metros. O pacote é mergulhante para Sudeste  $70^{\circ}$ . Os pontos mais altos desta linha apresentam altitudes média de 1050 metros, com desenvolvimento longitudinal de dezenas de quilômetros. Sua extensão inter diques é de 1.900 metros.



FOTO 19. VISTA DA CRISTA QUARTZO - FILÍTICA QUE COMPÕE A CqfNW, FOTO TIRADA A PARTIR CdbSW. (Almirante Tamandaré/São Miguel)

A CqfSE é composta na linha de crista por quartzito (ver Foto 20), com espessura de 30 metros e nos flancos por filito com espessura de 400 metros. O pacote é mergulhante para Sudeste  $70^{\circ}$ . Os pontos mais altos desta linha apresentam altitude média de 1030 metros, com desenvolvimento longitudinal de dezenas de quilômetros. Sua extensão entre os diques de diabásio é de 1700 metros.



FOTO 20. VISTA DA CRISTA QUARTZO - FILÍTICA QUE COMPÕE A CqfSE.  
(Almirante Tamandaré / São Miguel)

De um modo geral, o relevo da área estudada, é dissecado, com predomínio de vertentes convexas nos topos de composição quartzítica ou diabásica, retilíneas nas médias e baixas encostas de composição filítica, finalmente tornando-se côncavas na porção de base, coincidente ao domínio dos mármore carstificados.

As vertentes das Cdb's tendem a um perfil mais abrupto na extensão de afloramento da rocha básica suavizando-se a partir de seu encobrimento pelos filitos. O mesmo ocorre nas Cqfs respectivamente na transição quartzito/filito, podendo ser visto na Figura 19.

Na área de abrangência dos mármore, devido ao fenômeno da carstificação são evidentes formas cársticas, localmente representadas por dolinas de recarga, de descarga e sumidouros, conferindo um modelado ondulado característico.



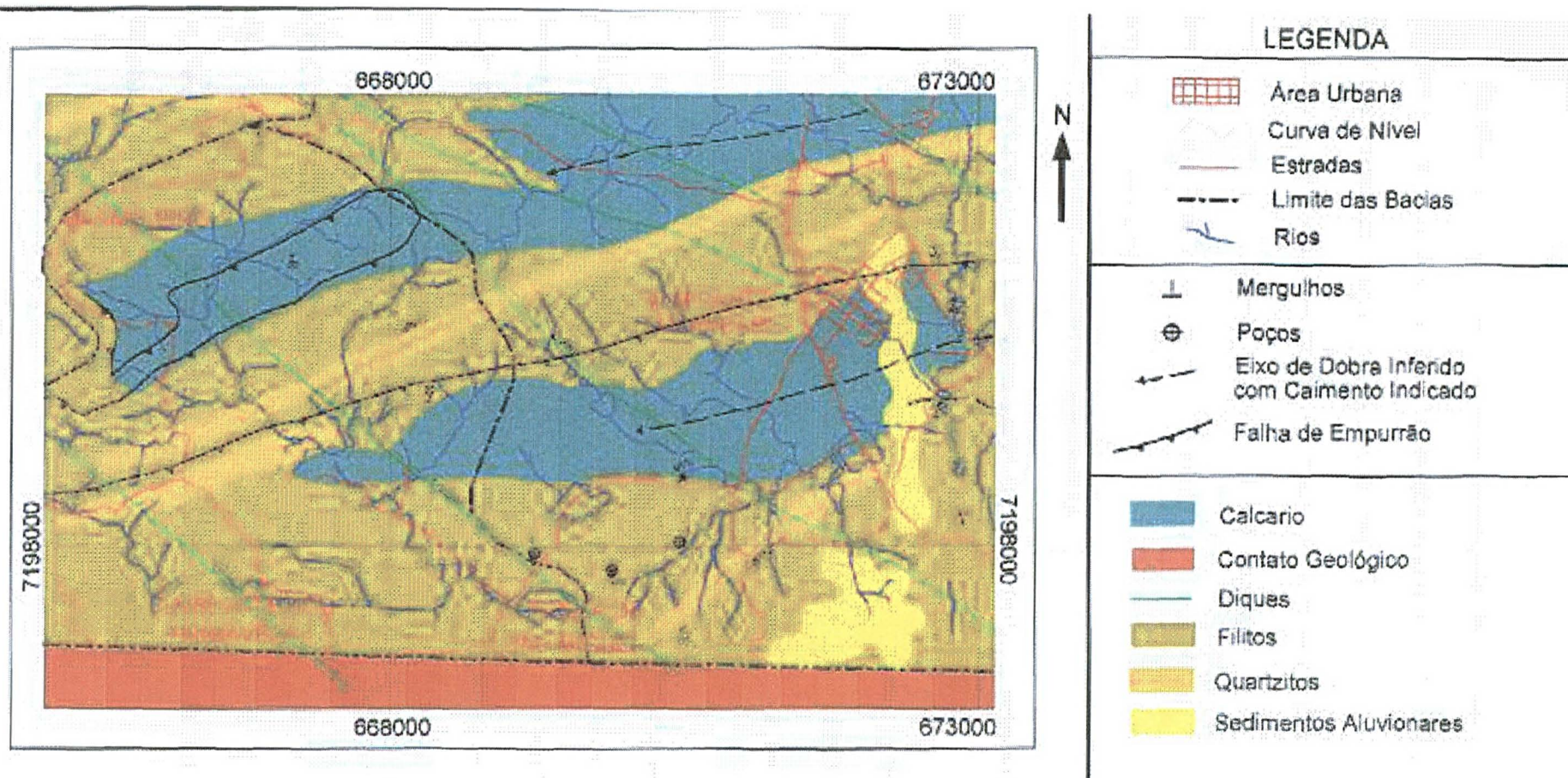


FIGURA 19. MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA COM REPRESENTAÇÃO DAS LIMITANTES IMPERMEÁVEIS.



As dolinas encontradas na área investigada têm forma circular a elíptica, larguras e profundidades variadas, contornos sinuosos e não angulosos, podendo estar preenchidas com água em função do regime das precipitações. O alinhamento de dolinas, verificado no mapa de formas cársticas sugere um controle estrutural dessas formas, caracterizando-as como dolinas de dissolução relacionadas à absorção do escoamento superficial, de forma difusa, ao longo de fraturas e juntas.

## 7.2 CONDICIONAMENTO HIDROGRÁFICO

O compartimento é seccionado pela linha de interflúvio entre as bacias do rio Barigüi e Passaúna, apresentado na Figura 20.

O padrão geral de drenagem é retangular, controlado pela direção das cristas de quartzito e diabásio, gradando para dendrítico e paralelo nos talvegues de primeira e segunda ordem, condicionado à presença de filito e mármore respectivamente como substrato.

A bacia do rio Barigüi, apresenta suas nascentes a altitudes de 1.100 m, na localidade de Tranqueira, sendo subdividida em uma série de *tanques* interconectados pela drenagem secundária, correspondendo sua vazão de base ao cruzar a linha de contato com o complexo Gnaíssico-Migmatítico, ao somatório da vazão de base em cada tanque.

A afluição do Barigüi, em seu talvegue principal, é nitidamente controlada pelo CdbNE, tornando-se perene a partir do único ponto de surgência existente na área. A jusante desta, identifica-se um barramento artificial, construído pelo proprietário da área, formando um pequeno lago, o qual diminui a vazão de surgência, elevado a piesometria da mesma por afogamento.

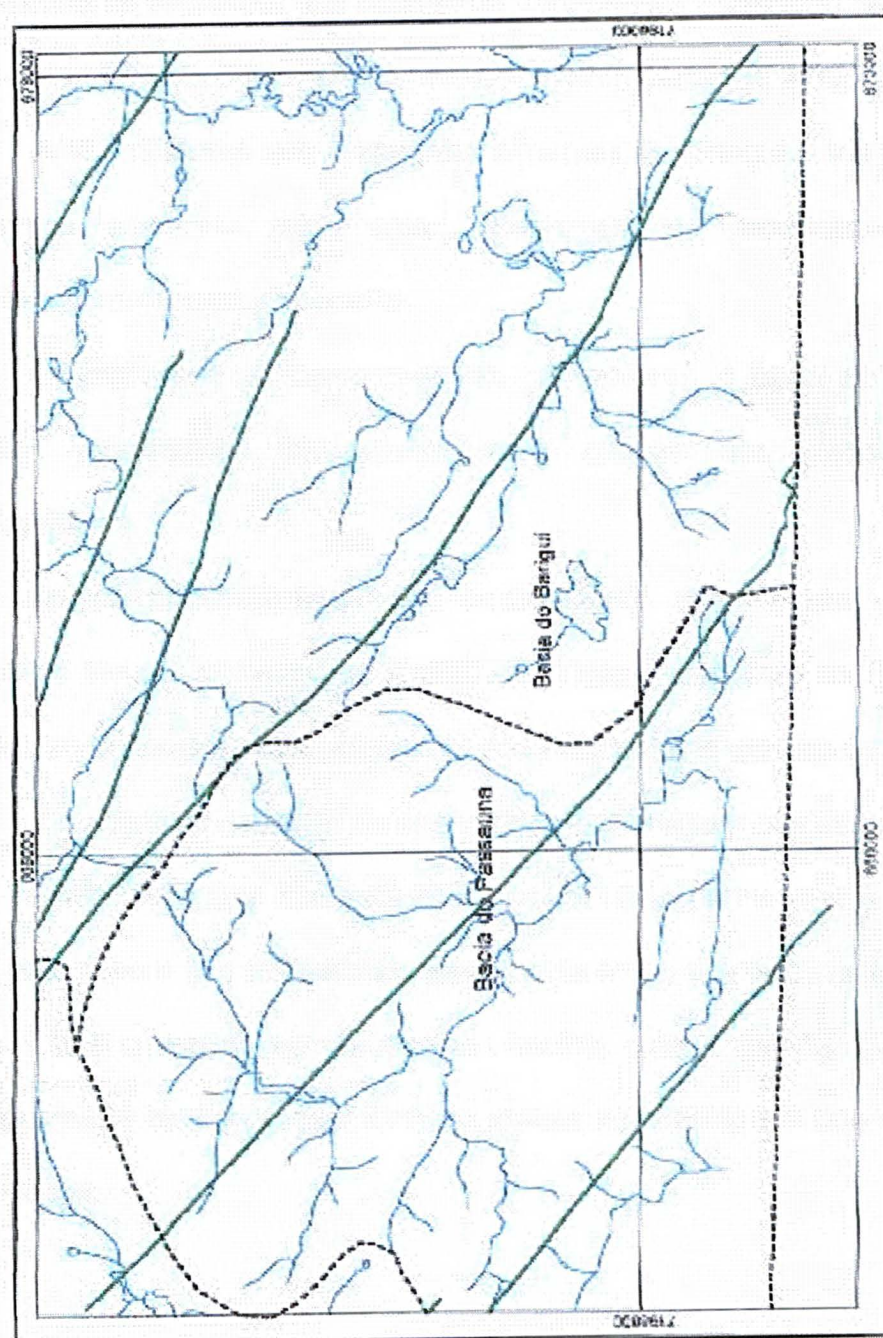


FIGURA 18 HIDROGRAFIA DA ÁREA.

A bacia do Passaúna, tem características mais evidentes de controle estrutural, dando a nítida impressão de ter capturado a quase totalidade da drenagem do tanque vizinho a NW da CqfNW, por rompimento consecutivo da CdbSW.

Seu nível de base local, é inferior ao da bacia do Barigüi, fato este denotado por uma quebra abrupta de relevo no ponto em que a afluência do Passaúna, no compartimento em estudo rompe a limitante CdbSW. Esta limitante comporta-se como linha de interflúvio, até o ponto de rompimento, sugerindo que anteriormente a este episódio, toda drenagem do compartimento pertencia à bacia do Barigüi.

A intermitência das drenagens efluentes do Barigüi, até o único ponto de surgência existente, pode estar relacionada ao rebaixamento piezométrico ocasionado pela captura ocorrida.

A drenagem do compartimento pertencente à bacia do Passaúna, tem caráter intermitente, tornando-se ativa apenas nos períodos de intensa pluviosidade.

Complementando as feições de drenagem, observam-se alguns açudes na cobertura filitosa no flanco da CqfSE, e dolinas saturadas no flanco da CqfNW, identificando pequena disponibilidade dos recursos hídricos em superfície.

É evidente o aumento da densidade de drenagem nos flancos das limitantes, com padrão dendrítico, fato este indicativo da baixa permeabilidade do substrato, o que associado a alta declividade favorece de forma significativa à escorrência.

Os talvegues apresentam um caráter coletor das águas de precipitação, desaguando e promovendo infiltração efetiva na medida que atingem as áreas dolinizadas.

A partir deste ponto, a drenagem torna-se esparsa e até ausente, com padrão indefinido, qualificando excelentes condições de permeabilidade em subsuperfície, o que associado à suavização do relevo, promove a diminuição do escoamento superficial e aumento da infiltração.

### 7.3 CONDICIONAMENTO CLIMÁTICO

Pela análise dos dados hidrológicos existentes, apresentados graficamente na Figura 21, verifica-se situação de estiagem em 1 ano a cada 10 anos, quando então pode haver déficit hídrico, o qual no entanto é plenamente compensado nos 9 anos subsequentes, constituindo o gerenciamento deste episódio, apenas uma questão de manejo com vistas à regularização dos volumes de longo prazo disponíveis.

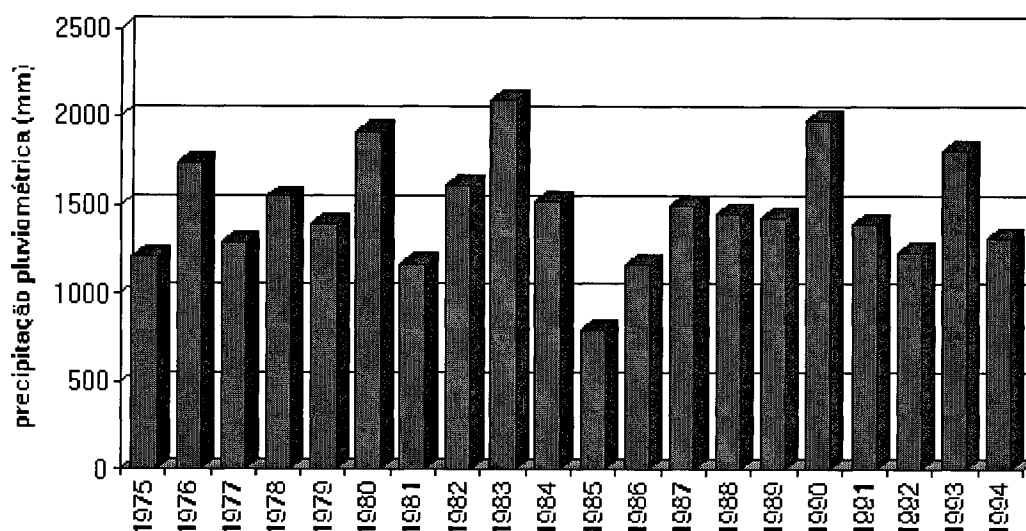


FIGURA 21. HISTOGRAMA MOSTRANDO A PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA ANUAL - PERÍODO 1975-1994. ESTAÇÕES COLOMBO (1975-1985) E JUQUIRI (1986-1994)

A diferença entre a evapotranspiração ( $E_t$ ) e a precipitação ( $P$ ) é de 28,08% e, entre a vazão total ( $V_t$ ) e a precipitação é de 31,16%. Isto significa que, da quantidade total de água que entra no sistema sob a forma de precipitação, 28,08% deixa o sistema sob a forma de evapotranspiração e 31,16% através da vazão do rio e de fontes. Do total de água precipitada, 23,03% representa o escoamento básico ( $V_b$ ), que corresponde à recarga de transição.

Para as características climáticas existentes, a evapotranspiração representa uma parcela significativa em termos de volumes de água circulante (aproximadamente um terço da precipitação), tendo sua ação limitada a uma profundidade de 3,00 metros abaixo da superfície.

Na equação fundamental do balanço hídrico,  $P = V_t + E_t + V_i$ , onde ( $V_i$ ) volume infiltrado, a possibilidade do aumento deste último pela exploração mais intensa dos aquíferos, e simultânea recarga artificial e ou induzida do volume de espera assim criado, concorrerá para uma diminuição de  $E_t$  e  $V_t$ , afim de satisfazer a condição da igualdade.

Conforme comentado anteriormente, os volumes estocados em subsuperfície praticamente ficam isentos do fenômeno da evapotranspiração, sendo este o acréscimo real conseguido.



## **8. COMPARTIMENTAÇÃO HIDROGEOLÓGICA**

## **8 COMPARTIMENTAÇÃO HIDROGEOLÓGICA**

O aquífero Cárstico, enquadra-se quanto ao armazenamento, como do tipo secundário, com porosidade resultante dos processos de dissolução efetivados no corpo da massa carbonática, podendo do ponto de vista hidráulico comportar-se de forma livre ou confinada, dependendo das relações do pacote aquífero com as limitantes impermeáveis.

Ao contrário dos demais aquíferos, apresenta uma característica peculiar de variação de volume de armazenamento, ao longo do tempo, através do consumo da massa carbonática pelos processos de dissolução.

A existência de tal tipo de aquífero, pressupõe a presença de massas de rocha com grande capacidade de dissolução, associadas a um clima que possibilite superávit hídrico, sendo a água o agente dinâmico ativo para o seu desenvolvimento.

As fronteiras impermeáveis, que delimitam a massa de rocha solúvel, representam o limite máximo de evolução dos processos de carstificação, sendo o potencial aquífero tanto maior quanto maior o volume da referida rocha.

A extensão da carstificação, em profundidade, esta condicionada a um ou mais níveis de base, onde se efetiva a descarga do manancial, normalmente com águas saturadas em relação ao constituinte solúvel da rocha, possibilitando assim a renovação nas áreas de recarga com águas subsaturadas, as quais tornarão o processo em atividade.

A ausência do pacote solúvel, por inexistência ou atingimento do substrato impermeável, da oferta d'água por flutuações climáticas e ou de um nível base de

descarga, são fatores que juntos ou de forma isolada, inviabilizam o processo de carstificação.

O Grupo Açungui é composto por uma seqüência de rochas epi-meta sedimentares, as quais se limitam com as rochas Granitóides do Embasamento Cristalino por uma linha quebrada de falhas inversas, de direção geral NE-SW, a cerca de 7 km ao norte de Curitiba. Constitui-se predominantemente de Filitos, Quartzitos, Mármore Calcíticos e Dolomíticos, Mica Xistos, Metarcósios, Conglomerados e Metabasitos lenticulares, orientados segundo a direção geral NE-SW.

Transversalmente a esta direção, mais especificamente na direção NW-SE, o pacote metamórfico foi seccionado por um notável enxame de diques de Diabásio, de idade Mesozóica, correspondendo aos condutos de alimentação dos derrames Basálticos da Formação Serra Geral.

Em termos hidrogeológicos, fica caracterizada a compartimentação, já descrito anteriormente.

Os fatores intervenientes na amplitude da carstificação e seu condicionamento hidráulico, para cada tanque, são representados por :

- volume de massa carbonática entre as fronteiras impermeáveis ;
- grau de solubilidade em função da composição química da rocha ;
- densidade de fraturamentos da mesma ;
- relações estratigráficas entre as litologias impermeáveis e o pacote carbonático ;
- volume de água circulante, através da descarga de base superficial ou profunda, com a drenagem de superfície.

Cada célula losangular, apresenta parâmetros hidráulicos próprios, tais como área de recarga, área de descarga, piezometria, grau de confinamento, volume de armazenamento, porosidade efetiva e permeabilidade, os quais dependerão do maior ou menor desenvolvimento do aparelho cárstico na unidade.

Considerando a grande variação dos parâmetros hidráulicos de um unidade para outra, devido ao carácter compartimentado do aquífero, a abordagem para o detalhamento dos potenciais exploráveis deve ser feita célula a célula, mediante a identificação e quantificação dos principais fatores intervenientes de cada unidade.

A litologia, é o fator determinante para a diferenciação do comportamento hídrico, em relação a Unidade do complexo Gnaíssico-Migmatítico, mais especificamente pela presença dos pacotes carbonáticos.

O carácter diferenciador, é a capacidade de dissolução apresentada pelos mármore. A exposição dos pacotes carbonáticos, intensamente fraturados, a um clima úmido estabelecido a partir do período Quaternário, onde predomina um superávit de água no balanço hídrico, ocasionou significativos processos de dissolução dos mesmos.

Os processos de dissolução, ampliam extraordinariamente o volume de vazios, originalmente apresentado pelos fraturamentos existentes nos mármore carbonáticos, incrementando concomitantemente a capacidade de armazenamento subterrâneo.

Segundo este modelo evolutivo, pode-se individualizar em cada compartimento, o seguinte condicionamento hidrogeológico:

#### 8.1 ÁREAS DE AFLORAMENTO DA ROCHA CARBONÁTICA :

Na área de afloramento dos mármore identificam-se duas zonas :

### 8.2.1 Zona recarga do aquífero no compartimento :

Corresponde à porção mais elevada, com ausência de drenagem, e intensamente dolinizada, localizando-se imediatamente em seqüência à quebra de relevo a partir da qual assinala a transição entre rochas carbonáticas e as rochas silicatadas insolúveis.

O relevo é caracteristicamente plano ondulado, com uma altitude média de 870 metros, representando o potencial hidráulico de recarga no compartimento (ver Foto 21).

A cobertura é feita por solo do tipo siltico argiloso coluvial, com espessura e permeabilidade média, onde se instala um manto de saturação freática, o qual vai alimentar através dos condutos principais a recarga do aparelho cárstico subjacente.

As dolinas e até mesmo coalescências de duas ou mais dolinas são as principais formas cársticas de recarga na área (ver Foto 22). São estruturas fechadas, com seus cones de absorção totalmente preenchidos por material residual ou coluvial, conferindo, deste modo uma boa capacidade de depuração das águas provenientes da superfície.

A maior parte das dolinas apresenta-se saturada apenas nos períodos de grandes precipitações, ocorrendo no entanto um pequeno número de dolinas permanentemente saturadas com exposição de lâmina permanentemente (ver Foto 23).

O escoamento subterrâneo, é do tipo livre, havendo grandes dificuldades nestas áreas de implantação de açudes para uso agrícola, denotando a alta capacidade de infiltração do solo.



A drenagem de superfície é incipiente, freqüentemente, ocorrendo nestas porções o desaparecimento de pequenas drenagens oriundas das rochas silicatadas à montante, coletando deste modo as águas do freático e do



escoamento superficial para a efetiva recarga do aquífero.

**FOTO.21 VISTA DA ZONA DE RECARGA COM RELEVO ONDULADO (Almirante Tamandaré / São Miguel)**





FOTO.22 ZONA DE RECARGA COM ÁREA DOLINIZADA, OCUPADAS POR PEQUENOS AÇUDES. (Almirante Tamandaré / São Miguel)



FOTO.23 ZONA DE RECARGA COM DOLINA TÍPICA SATURADA EM ÁGUA PERMANENTEMENTE (Almirante Tamandaré / São Miguel)

A piezometria do freático é positiva em relação ao aquífero, sendo a água circulante normalmente não saturada em seus constituintes químicos, com menor conteúdo de sólidos totais dissolvidos, e portanto capaz de dissolução durante seu fluxo. Nesta região predomina o intemperismo químico sobre o físico na esculturação das formas cársticas.

#### 8.2.2 Zona de descarga do aquífero no compartimento

Em seqüência, na área de afloramento dos mármore, identifica-se nas porções mais baixas, correspondendo a um relevo aplainado a qual faz limite de forma brusca com a CdbNE, a ocorrência da única surgência do compartimento, ocasionada pelo barramento do fluxo subterrâneo pela fronteira impermeável.

A cobertura constituída por solo argiloso coluvial e eventualmente sedimentos areno-argilosos aluvionares, torna-se mais espessa, apresentando boa permeabilidade, com nível freático diretamente conectado ao aquífero.

A piezometria do aquífero, em certos pontos, suplanta a altitude potenciométrica de superfície, originando nestes casos surgências naturais do manancial subterrâneo. A drenagem de superfície torna-se permanente, alimentada pela descarga do freático e nos pontos de surgência, além deste, diretamente pelo aquífero representando esta última a vazão de base do compartimento.

A água circulante tende a atingir a saturação dos seus constituintes químicos em solução. Nesta região predomina a desagregação física sobre a química na esculturação do aparelho cárstico, apresentando doliniforme erosiva no ponto de surgência (ver Fotos 24, 25 e 26).



O escoamento é do tipo confinado ou semiconfinado em relação ao freático, dependendo do diferencial de permeabilidade apresentado entre os dois meios de fluxo.

## 8.2 ÁREAS DE AFLORAMENTO DAS ROCHAS SILICATADAS :

As áreas de afloramentos das rochas silicatadas, correspondem aos altos marginais das células e flancos de maior gradiente contíguos a estes altos. Segundo a direção Nordeste são compostos por quartzitos e filitos e na direção Noroeste compostos por diabásio.



FOTO 24 PONTO DE DESCARGA DO AQUÍFERO, REPRESENTADO POR SURGÊNCIA CÁRSTICA DOLINIFORME EROSIVA (Almirante Tamandaré / São Miguel).

### 8.2.1 Cristas de composição quartzítico-filíticas

A cobertura, é feita por solos do tipo argilosos, principalmente sobre os filitos, tornando-se areno-argilosa quando sobre os quartzitos. Quanto à origem,

caracterizam-se como solos autóctones, por situarem-se dentro da paisagem de vertentes num compartimento de alto gradiente, sujeito preponderantemente a processos de degradação, estabelecendo espessuras tanto menores quanto maior a inclinação da vertente.

As porções de topo, configuram-se como linhas de cristas divisórias entre células vizinhas, delimitando a área de captação de cada célula, como pode ser visto na Foto 27.



FOTO.25 ZONA DE DESCARGA PONTO DE SURGÊNCIA COM DETALHE DE BARRAMENTO ARTIFICIAL. PONTO A JUSANTE DA FOTO Nº24. (Almirante Tamandaré / São Miguel).



O potencial aquífero superficial é reduzido, sendo representado pelo nível freático desenvolvido na extensão dos solos, exteriorizando em superfície drenagem adensada e intermitente, característica de áreas com pequena capacidade de infiltração, tendo uma função coletora, para deságüe e infiltração a jusante nas áreas de recarga das rochas carbonáticas.



FOTO.26 PONTO DE DESCARGA DO AQUÍFERO, REPRESENTADO POR SURGÊNCIA EM FORMA CÁRSTICA DOLINIFORME EROSIVA, A MONTANTE DA FOTO N° 24. (Almirante Tamandaré / São Miguel).

Os flancos mergulhantes de quartzito e filitos, funcionam como camadas confinantes dos mármore carstificados subjacentes, havendo nenhuma ou quase nenhuma inter-relação direta, entre a hidráulica do freático estabelecido e o nível piezométrico do aquífero, apresentando escoamento do tipo livre no primeiro e confinado no segundo.



FOTO.27 LINHA DE CRISTA DIVISÓRIA DO COMPARTIMENTO AO FUNDO, CqfNW. (Almirante Tamandaré / São Miguel)

Este condicionamento é comprovado pela diferença de piezometria entre o poço cacimba N°1 e o poço tubular N°1, os quais apresentam-se isolados por uma cobertura de 40 metros de filito praticamente impermeável (ver Fotos 28, 29 e 30).

No que se refere a hidroquímica, as águas freáticas e as de escoamento superficial, apresentam baixo conteúdo de Sólidos Totais Dissolvidos e grau de saturação em relação ao  $\text{CaCO}_3$ , em função do tempo de residência limitado. O pH normalmente tende a um caráter ácido, tanto mais quanto maior o desenvolvimento do horizonte orgânico do solo.

As características das águas, acima descritas assumem papel significativo no processo de carstificação, na medida em que escoam para zona de recarga e possuem alta capacidade de dissolução em relação aos carbonatos.



Após o seccionamento do pacote filítico impermeável, atinge-se a massa carbonática intensamente carstificada, com potencial aquífero elevado (capacidade específica  $30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ ).

Referente ao grau de vulnerabilidade do aquífero, a área corresponde à situação de menor risco quanto às contaminações de superfície, em função do quase que completo isolamento das mesmas em relação ao manancial subterrâneo propriamente dito, devido ao capeamento do pacote quartzítico filitoso de característica impermeável interposto.

Do ponto de vista geotécnico, é a área que apresenta menores riscos, por apresentar uma cobertura de rocha competente capeando as estruturas carstificadas, estando livre dos solapamentos, por perda de material residual de preenchimento durante o bombeamento do aquífero.



FOTO.28 POÇO TUBULAR N° 1, A MONTANTE RESIDÊNCIA COM POÇO CACIMBA N°1. (Almirante Tamandaré / São Miguel)



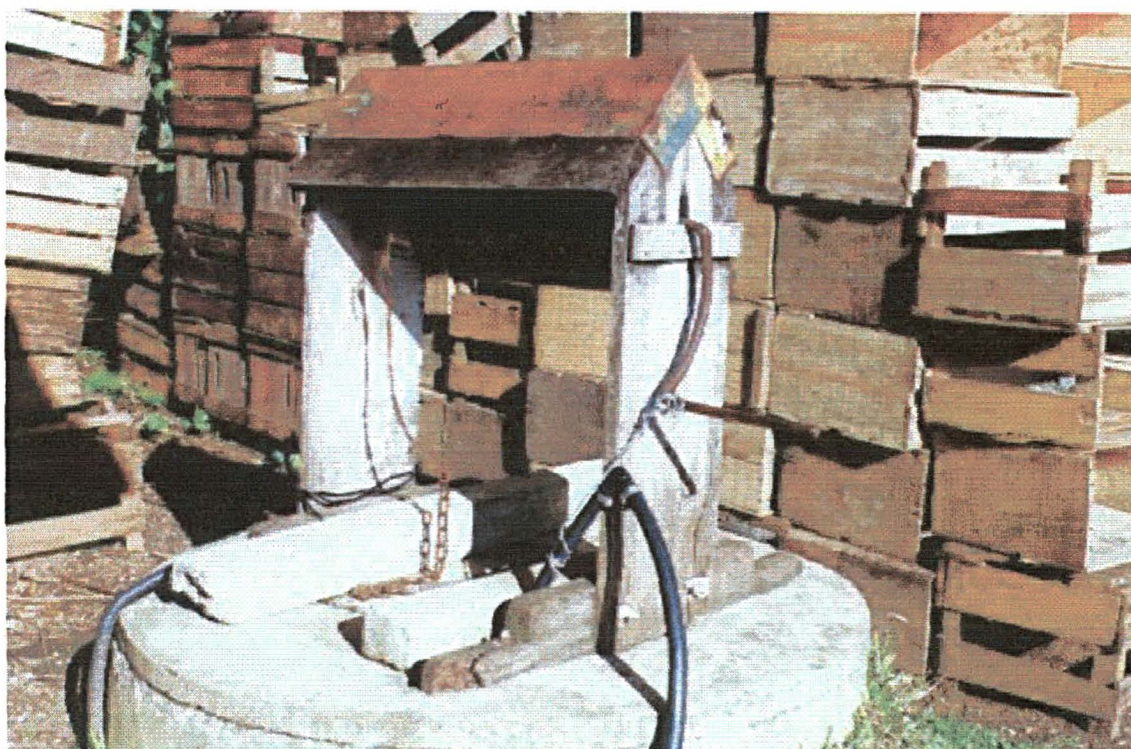


FOTO.29 POÇO CACIMBA, CAPTANDO ÁGUA DO FREÁTICO. (Almirante Tamandaré / SãoMiguel)

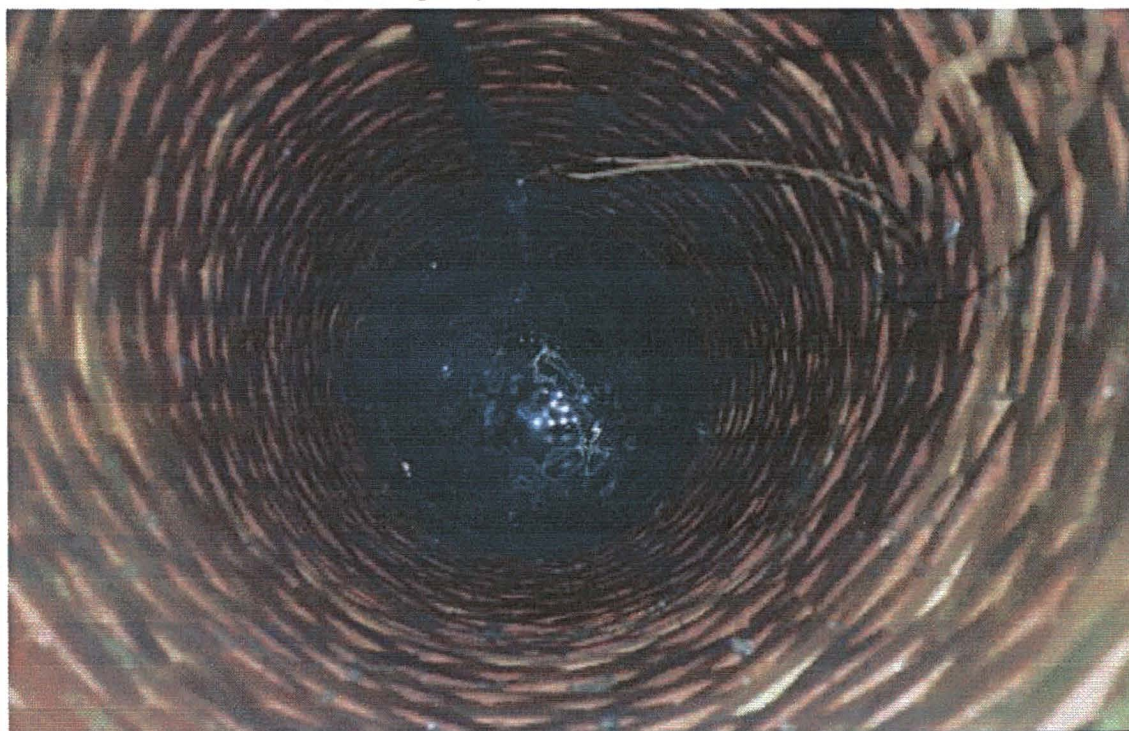


FOTO.30 VISTA INTERNA DE POÇO CACIMBA, NÍVEL D'ÁGUA 4,5 M DA SUPERFÍCIE, FREÁTICO DE FILITOS. (Almirante Tamandaré / São Miguel).

Sua situação distante do ponto de surgência, diminui os impactos relativos ao secamento de fontes, pela ampliação do raio do cone de depressão dois pontos de sangramento do aquífero.

#### 8.2.2 Cristas de composição diabásica

O enxame de diques instalado na zona axial do Arco de Ponta Grossa, com expressão na área do aquífero, apresenta intrusões com desenvolvimento longitudinal, muitas vezes atingindo a ordem de centenas de quilômetros, e com uma frequência de um dique a cada 2 quilômetros. Sem dúvidas trata-se do elemento morfológico estrutural de maior importância nos processos de carstificação, pela constância em área e pelo porte das estruturas.

A cobertura das Cdb's, é feita por solos do tipo latosolo vermelho escuro argiloso, com espessuras não superiores à 4 metros, tornando-se amarelados nas proximidades do contato com a rocha sã (ver Fotos 31, 32 e 33). Quanto à origem, caracterizam-se como solos autóctones, por situarem-se dentro da paisagem de vertentes num compartimento de alto gradiente, sujeito preponderantemente a processos de degradação, estabelecendo espessuras tanto menores quanto maior a inclinação da vertente. Na posição de topo de vertente são encontradas as maiores espessuras de solo, sendo característica diagnóstica deste tipo litológico a presença em meia encosta, de blocos arredondados por esfoliação esferoidal de superfície ("*pedras de bola*").

É desenvolvido no intervalo do solo e manto de alteração, um nível freático pouco expressivo, a exemplo do freático das Cqf sem conexão com o aquífero propriamente dito.





Foto 31 LINHA DE CRISTA CdbSW DIVISÓRIA DO COMPARTIMENTO AO FUNDO, CqfNW. (Almirante Tamandaré / São Miguel)



Foto 32 LINHA DE CRISTA DIVISÓRIA DO COMPARTIMENTO, CdbNE, SALIENTANDO LATOSOLO VERMELHO ESCURO COM TONS AMARELADOS PRÓXIMO AO TOPO. (Almirante Tamandaré / São Miguel)





Foto 33 DETALHE DA CRISTA DIVISÓRIA DO COMPARTIMENTO, CdbNE.  
(Almirante Tamandaré / São Miguel)

O corpo intrusivo apresenta-se bastante afetado por fraturas e juntas impermeáveis, em sua maior parte de cisalhamento rejuntadas. Este comportamento é evidenciado por inúmeros poços, totalmente improdutivos seccionando apenas o diabásio.

O dique de diabásio, não obstante seu caráter de fronteira impermeável, é o evento de maior significância no desenvolvimento de carstificação, por promover o fraturamento das encaixantes ao longo de seu desenvolvimento longitudinal durante a intrusão (ver Foto 34).

Nas fronteiras constituídas pelos diabásios, por seu desenvolvimento subvertical, não são criadas condições de confinamento, funcionando os mesmos principalmente como barreiras hidrogeológicas, que interceptam e favorecem o fluxo vertical ascendente do aquífero nas suas imediações, dando origem a surgências naturais do mesmo.

Em um mesmo dique, no bordo oposto aonde ocorrem as surgências, os fraturamentos ocasionados pela intrusão na encaixante serão também alvo de carstificação promovendo, no entanto, recarga do aquífero. Desta forma cada Cdb possuem um flanco preferencial promovendo descarga por barramento do sentido do fluxo, e outro já na abrangência do tanque vizinho, correspondendo ao flanco de recarga.

Do ponto de vista geotécnico, são as áreas de menor risco, por não serem suscetíveis aos processos de carstificação, e apresentarem pouca ou quase nenhuma conexão hidráulica com o aquífero, tornado-se assim imunes aos efeitos nocivos dos bombeamentos executados.

Os problemas de subsidência que possam vir a ocorrer, estão relacionados à movimentação de solos (creeping), em direção a zonas deprimidas, principalmente próximo a faixas de contato morfológico, e quando o gradiente da encosta for acentuado.



FOTO. 34 AFLORAMENTO DO DIQUE DE DIABÁSIO, CdbNE. (Almirante Tamandaré / São Miguel).

## **9. ZONEAMENTO COM VISTAS À EXPLOTAÇÃO E USO DO SOLO**



## 9 ZONEAMENTO COM VISTAS À EXPLOTAÇÃO E USO DO SOLO

### 9.1 PERFIL ATUAL DA OCUPAÇÃO E USO DO SOLO

Atualmente, a vegetação original da área em estudo encontra-se totalmente alterada e quase que inexistente, devido principalmente à procura de madeiras de lei, aos campos de cultivo e à extração de lenha, como pode ser visto na Foto 35.



FOTO 35 VISTA DA VEGETAÇÃO ATUAL, COMPOSTA POR ARBUSTOS NO PRIMEIRO PLANO E PLANTIOS DE HORTALIÇAS AO FUNDO. (Almirante Tamandaré / São Miguel)

A cobertura vegetal primitiva pertencia à floresta subcaducifolia subtropical com *Araucaria angustifolia*. Segundo Klein (1962), essa floresta era formada por estratos arbóreos superior e inferior, e um estrato arbustivo. No estrato superior, predominavam as matas de pinheiro, enquanto que o inferior era composto, em sua

maior parte, por um sub-bosque de imbuia, sassafrás, canela coqueira e erva-mate. O estrato arbustivo caracterizava-se pela presença de fumo-bravo e o tapexingui.

Com a exploração intensiva do pinheiro e da imbuia como madeiras de lei, a mata original foi substituída por uma mata secundária caracterizada pela presença de bracatinga, canela-sebo, vassourão branco e taquara lisa, e de uma vegetação rasteira (arbustos e ervas).

Nas cristas dos morros, ocorre um outro tipo de vegetação, constituída por campos, com predomínio de gramíneas baixas e pequenos arbustos, sendo os mais comuns denominados de vassourinha e carqueja.

Em vários pontos da área, observam-se zonas de pastagens e campos de cultivo, em sistema de roças, sendo estes principalmente de milho, feijão e hortifrutigranjeiros. Em pontos de meia encosta ocorrem matas artificiais caracterizadas pelos reflorestamentos de bracatinga, em diversos estágios de desenvolvimento. Esses reflorestamentos são utilizados para obtenção de carvão vegetal e como lenha para os vários fornos de cal existentes na região.

As atividades agrícolas desenvolvidas, na área em questão, constituídas principalmente por horticultura, lança mão do uso de agrotóxicos, com vistas ao combate de pragas (ver Fotos 36 e 37). Segundo este enfoque, é de se presumir, dependendo das características locais do aquífero (maior ou menor espessura de solo, localização junto ou a montante de áreas de recarga, etc.), que possam haver contaminações decorrentes destas atividades. Até o presente momento, no entanto, são praticamente inexistentes análises da água específicas para agrotóxicos, tanto do nível freático quanto de águas do aquífero Carste, sendo portanto prematuras quaisquer conclusões a este respeito.



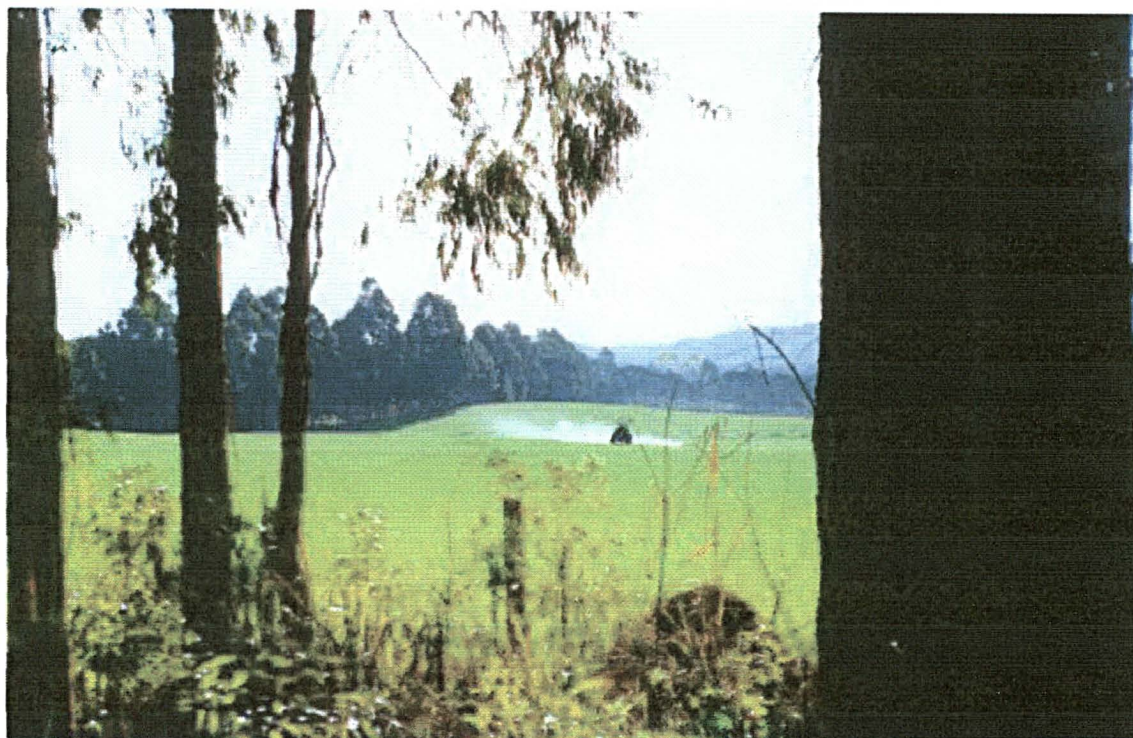


FOTO 36 DETALHE DA PULVERIZAÇÃO DE AGROTÓXICOS EM LAVOURA DE TRIGO, NA ZONA DE RECARGA .(Almirante Tamandaré / São Miguel)



FOTO 37 DETALHE DE EQUIPAMENTO DE PULVERIZAÇÃO DE AGROTÓXICOS EM LAVOURA DE CENOURA, NA ZONA DE DESCARGA, SURGÊNCIA AO LADO DA CdbNE. (Almirante Tamandaré / São Miguel).



Em visita feita a campo pode-se observar, que a grande maioria dos agricultores preocupa-se com a disposição das embalagens de agrotóxicos após sua utilização, havendo no entanto uma carência quanto a local de estocagem, transporte e finalmente destinação adequada das mesmas (ver Foto 38). Neste sentido pode-se constatar a inexistência de aparelhamento necessário como : caminhões para coleta, depósitos específicos para embalagens, usina de reciclagem ou incineração. Tal aspecto de maior relevância é passível de modificação mediante uma proposta integrada de ações, envolvendo a comunidade agrícola, com o apoio dos poderes municipal e estadual.



FOTO 38 DETALHE DE EQUIPAMENTO DE LAVAGEM DE HORTALIÇAS, NA ZONA DE DESCARGA, SURGÊNCIA AO LADO DA CdbNE, COM AUMENTO DE TURBIDEZ NO MANANCIAL DE SUPERFÍCIE. (Almirante Tamandaré / São Miguel)

Apesar de situar-se fora da área de estudo, é digno de nota o assentamento urbano da cidade de Almirante Tamandaré como uma possibilidade futura de tipo de ocupação e uso do solo, devendo ser regulamentado através de Planos Diretores os quais levem em conta, as características do meio físico para o seu estabelecimento. A maioria da população do município, não se situa na sede, mas em bairros dormitórios de Curitiba (Cachoeira, Maracanã, etc), até o momento sobre áreas do complexo Gnaíssico-Migmatítico, havendo no entanto loteamentos recentes bastante próximo do contato com o grupo Açungui (ver Foto 39).



FOTO 39 DETALHE DE ADENSAMENTO POPULACIONAL RECENTE, NAS PROXIMIDADES DA ÁREA PRÓXIMO À CqfSE. (Almirante Tamandaré / São Miguel)

Segundo as vocações naturais aliadas às dificuldades geotécnicas e morfológicas da região para assentamentos urbanos, seria bom alvitre o



deslocamento de distritos industriais e novos loteamentos urbanos para áreas de abrangência do Complexo Gnaíssico-Migmatítico, existentes no município

O fenômeno da carstificação gera condições altamente instáveis no substrato rochoso, pela presença de cavernas, preenchimento de áreas abatidas com material coluvial ou aluvionar e zonas intensamente dolinizadas. Segundo este condicionamento, tais regiões caracterizam-se como de grande risco para assentamentos urbanos, carecendo de estudos prévios para sua efetivação.

É importante ressaltar que, com vistas às medidas de monitoramento e sistemática de utilização do aquífero, os impactos geotécnicos decorrentes da exploração do mesmo, vão estar circunscritos a unidade celular onde é provocada a alteração, com pequeno ou nenhum reflexo nas células contíguas.

Tal condicionamento, direciona para uma avaliação caso a caso, segundo as características particulares de cada unidade, porém descarta a generalização de um alto grau de dificuldade para o todo, à exemplo da célula de Almirante Tamandaré, possibilitando uma gama ampla de situações onde o critério de seleção seria segundo menor grau de dificuldades para exploração, pode ser eleito.

No aspecto vulnerabilidade às contaminações, as surgências naturais (fontes) apresentam menores riscos que as zonas de recarga, visto serem influentes em relação à drenagem de superfície. O fluxo do manancial é do aquífero para a drenagem de superfície, havendo descarga através das fontes e nunca recarga, sendo portanto improváveis nestes locais contaminações, mantidas as condições naturais de surgência.

Tal situação pode ser modificada mediante rebaixamento da superfície piezométrica do aquífero, através do bombeamento do mesmo, assumindo assim

um posicionamento inferior à drenagem de superfície, sendo neste caso recarregado pela mesma.

Importante ainda alertar, que a zona de descarga de uma célula elevada, em relação a uma contígua, pode fornecer abastecimento para a zona de recarga da inferiormente situada através da drenagem de superfície, sendo este um aspecto a ser considerado nas medidas de proteção, mesmo em áreas de surgência.

## 9.2. DIRETRIZES PARA OCUPAÇÃO E USO DO SOLO

Dentro do contexto delineado para o compartimento, evidencia-se que a área de um modo genérico não é adequada para adensamentos populacionais tipo loteamentos, devendo observar as vocações naturais impostas pelas características do meio físico, qual sejam : a produção de água para abastecimento público ; uso agrícola controlado como cinturão verde na produção de hortigranjeiros, reflorestamentos e piscicultura ; extração mineral de calcário e, finalmente, em regiões de patrimônio espeleológico a exploração do ecoturismo.

Conforme o zoneamento anteriormente estabelecido para a unidade compartimental, a adequação das vocações existentes deve seguir o seguinte modelo :

### 9.2.1 ÁREAS DE AFLORAMENTO DA ROCHA CARBONÁTICA :

A área de afloramento das rochas carbonáticas, representa a exposição do aquífero propriamente dito, correspondendo normalmente às partes mais baixas da unidade , onde ocorrem os processos de recarga e descarga do mesmo.

Em termos de evolução do relevo, pela intensificação da carstificação, é uma região com constantes movimentações de caráter contínuo com intercalações de movimentos bruscos.



A zona de recarga, no que tange a vulnerabilidade do aquífero, é a região que requer maiores cuidados, representando o caminho de acesso principal, das possíveis contaminações de superfície, devendo portanto obedecer as maiores restrições quanto ao uso e ocupação do solo.

Do ponto de vista geotécnico, apresenta riscos de solapamentos por perda de material residual que preenche o cone das dolinas, pelo aumento da velocidade de fluxo durante bombeamentos. Trata-se de uma região com alto grau de dificuldades durante as perfurações, com constantes solapamentos, exigindo a utilização da sistemática de revestimento simultâneo.

O uso adequado desta área poderia melhorar as condições de recarga tanto em qualidade como em quantidade. Este objetivo pode ser conseguido através da instalação de açudes para uso em piscicultura, representando estes uma reserva estratégica de acumulação de água durante a estação chuvosa onde ocorre o superávit hídrico.

O uso agrícola no que se refere a produção de hortigranjeiros deve ser evitado, pela necessidade da utilização de fertilizantes e agrotóxicos, sendo o reflorestamento uma alternativa aceitável, uma vez que tende a recompor parcialmente as condições originais da paisagem.

Deve ser restrito o assentamento de moradias pela instabilidade geotécnica e pelo risco de contaminação por esgotos domésticos. Não apresenta, por outro lado, interesse para extração mineral uma vez que o calcário (Mármore), subjacente encontra-se totalmente carstificado.

Os projetos hidrogeológicos, deverão convergir para dispositivos que promovam a recarga do aquífero, tais como poços para recarga artificial alimentados por escoamento superficial após percolação em filtros de grama ou granular.



FOTO 40 DETALHE DE ÁREA DE RECARGA COM POSSIBILIDADES DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA EM SUPERFÍCIE PARA POSTERIOR RECARGA ARTIFICIAL. (Almirante Tamandaré / São Miguel)

A zona de descarga, apresenta menores riscos quanto a vulnerabilidade que a zona de recarga, visto ser influente em relação à drenagem de superfície, diminuindo as possibilidades de contaminações provindas da mesma.

Do ponto de vista geotécnico, apesar de se configurar como a área de maior potencial produtivo, é a que apresenta maiores possibilidades de riscos. Além dos solapamentos por perda de material residual de preenchimento das estruturas

cársticas, adicionam-se os adensamentos das argilas de cobertura, decorrentes do rebaixamento do nível freático durante o bombeamento do aquífero.

A exploração do aquífero, próximo aos pontos de surgência, apresenta como inconveniente os efeitos de interferência, diminuindo a vazão ou até a completa extinção das mesmas.

A perfuração de poços, à exemplo da zona de recarga, apresenta alto grau de dificuldades, com as complicações adicionais advindas da maior espessura de cobertura e presença de materiais aluvionares inconsolidados, com alto grau de friabilidade, ocasionando constantes solapamentos e perda de circulação. Mais do que nunca, a utilização da metodologia de revestimento simultâneo torna-se indispensável.

Complementando o quadro das instabilidades geotécnicas nesta zona, são possíveis fenômenos de colapso de tetos de cavernas, devido ao alívio da pressão hidrostática vertical, ocasionado por rebaixamentos exagerados durante a exploração do aquífero. Estes eventos são de rápida duração e localizados, podendo afetar áreas com raio de mais de 500 metros ao entorno do ponto colapsado.

O uso agrícola deve ser controlado, no que se refere à produção de hortigranjeiros, pela necessidade da utilização de fertilizantes e agrotóxicos, modificando-se os hábitos como o de lavagem de vegetais ou de tanques de aplicação de agrotóxico junto à drenagem existente. O desenvolvimento de práticas agrícolas como a hidroponia, configura-se como adequado devido à abundância de água existente, e pela quase ausência de agrotóxicos.

Sugere-se a recuperação da área contígua às fontes com mata nativa, e a elevação da piezometria local por barramento destas fontes junto às Cdb's, possibilitando assim uma regularização da vazão de surgência nos diferentes períodos hídricos anuais.

Deve ser restringido o assentamento de moradias pela instabilidade geotécnica e pelo risco de contaminação por esgotos domésticos.

### 9.2.2 ÁREAS DE AFLORAMENTO DAS ROCHAS SILICATADAS

A área de afloramento das rochas silicatadas, representa os limites da evolução dos processos de carstificação em cada unidade, correspondendo as partes mais elevadas da unidade e meia encosta, e sendo as responsáveis pelo confinamento do aquífero em profundidade. Abastece as zonas de recarga situadas a jusante, em função da baixa permeabilidade do substrato privilegiando o escoamento superficial.

Em termos de evolução do relevo, tende diferenciarem-se positivamente, em relação as área carstificadas, sendo uma região mais estável quanto a movimentações.

No que tange a vulnerabilidade do aquífero, trata-se da região menos suscetível, estando isolada do mesmo, pela cobertura quartzo filítica, afastando as possíveis contaminações de superfície, estando apta portanto a um desenvolvimento mais amplo do uso e ocupação do solo.

Do ponto de vista geotécnico, não apresenta riscos de solapamentos por estar fora da região de carstificação superficial devido a ausência da massa carbonática.



Apresenta o inconveniente, do incremento acentuado do gradiente da encosta, favorecendo assim aos processos erosivos, com possíveis ravinamentos.

O uso adequado desta área corresponderia à melhoria das condições da estabilidade de encosta, evitando acentuação dos processos erosivos, e o devido controle e se necessário tratamento dos efluentes gerados pela gama mais ampla de usos permitidos. Tal preocupação, justifica-se pela manutenção da qualidade d'água responsável pela recarga a jusante.

Este objetivo pode ser conseguido através da instalação de reservatórios decantadores destinados a lavagem de hortaliças, e abastecedouros comunitários para aplicação de agrotóxicos e lavagem de tanques, numa primeira etapa.

O uso agrícola pode ser desenvolvido, implementado novas tecnologias de manejo como a adubação orgânica, irrigação por gotejamento, hidroponia e plantio em curvas de nível, as quais visam a melhoria do ambiente hídrico por diminuição do uso de fertilizantes e agrotóxicos, otimização do uso da água e contenção de perdas de solo respectivamente.

Nas partes mais íngremes das encostas, sugere-se o reflorestamento como uma alternativa recomendável evitando assim uma perda de solo acentuada, além de, recompor parcialmente as condições originais da paisagem.

O assentamento de moradias da comunidade rural, deve privilegiar os topos das limitantes impermeáveis ou as meia encostas filíticas, por sua estabilidade geotécnica e pela excelente capacidade de depuração dos esgotos domésticos por filtração em solo e mato de alteração de constituição argilosa.



FOTO 41 DETALHE DE ASSENTAMENTO ADEQUADO DE MORADIAS RURAIS JUNTO A ZONA DE TOPO DA CdbNE, COM MANUTENÇÃO DE PARTE DA VEGETAÇÃO NATURAL. (Almirante Tamandaré / São Miguel).

Em áreas de interesse para extração mineral, pela presença de pacotes carbonáticos não carstificados intercalados a quartzitos e filitos, a lavra do bem mineral deverá obedecer as exigências adequadas como, desmonte em bancadas, adequação do plano de fogo nas detonações, e planos de recuperação ambiental da área impactada. De qualquer forma deve-se estabelecer como limite máximo de aprofundamento da frente de lavra ao atingimento de zonas saturadas do aquífero.

Sugere-se, num futuro próximo, na medida em que se torne viável economicamente, a utilização de materiais não detonantes para desmonte da rocha, metodologia esta que evitaria uma série de impactos produzidos pelo abalo das



detonações sobre o aquífero, e um controle mais adequado da poluição atmosférica causada pelos fornos e moinhos da rocha calcária.



FOTO 42 DETALHE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA CAUSADA POR MOINHO/FORNO DE CALCÁRIO NAS PROXIMIDADES DA ÁREA DE ESTUDO. (Almirante Tamandaré / São Miguel)

Os projetos hidrogeológicos, deverão convergir para dispositivos de captação do aquífero nesta área, através de poços tubulares, tendo em vista a estabilidade getécnica com relação aos bombeamentos, conforme comentado anteriormente.

As porções de topo das cristas limitantes, tornam-se áreas de especial interesse, para implantação de reservatórios elevados e semi-enterrados, em projetos de distribuição de água para abastecimento público, devido ao seu notório potencial hidráulico em relação aos pontos de abastecimento, possibilitando

distribuição por gravidade, além da estabilidade do substrato quanto ao assentamento de fundações.

Em termos de manejo hídrico, o bloqueio parcial das descargas de escoamento, pela reconstrução das paredes das Cdb's, nos pontos de ruptura pela drenagem superficial, promoveria uma elevação do nível piezométrico generalizada no compartimento, vindo a saturar volumes carstificados atualmente secos pelo rebaixamento deste em épocas passadas pela modificação do nível base de descarga superficial. Tal procedimento ampliaria o volume de reserva no compartimento aumentando o potencial de regularização do aquífero.



FOTO 43 DETALHE DE BARRAMENTO DE FONTE, COM ELEVAÇÃO DO NÍVEL PIESOMÉTRICO FONTE DOS PADRES. (Almirante Tamandaré / Sede Municipal).



## **10. CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

## 10 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os fatores intervenientes na amplitude da carstificação e seu condicionamento hidráulico, para cada célula, são representados por :

- volume de massa carbonática entre as fronteiras impermeáveis ;
- grau de solubilidade em função da composição química da rocha ;
- densidade de fraturamentos da mesma ;
- relações estratigráficas entre as litologias impermeáveis e o pacote carbonático ;
- volume de água circulante, através da descarga de base superficial ou profunda, com a drenagem de superfície.

Cada célula losangular, apresenta dimensões e parâmetros hidráulicos próprios, tais como área de recarga, área de descarga, piezometria, grau de confinamento, volume de armazenamento, porosidade efetiva e permeabilidade, os quais dependerão do maior ou menor desenvolvimento do aparelho cárstico na unidade.

Considerando a grande variação dos parâmetros hidráulicos de um unidade para outra, devido ao carácter compartimentado do aquífero, a abordagem para o detalhamento dos potenciais exploráveis deve ser feita célula a célula, mediante a identificação e quantificação dos principais fatores intervenientes de cada unidade, através de :

- sondagem direta : sondagens estratigráficas, piezométricas e produtoras ;
- aplicação de metodologias indiretas : geofísica ( eletroresistividade, sísmica, gravimetria, etc) e geoquímica (traçadores ambientais e artificiais) ;

- hidráulica de poços : testes de aquífero e monitoramento piezométrico.

Para efeitos de uma avaliação de potencial de carácter amplo, objetivando uma estimativa global dos potenciais exploráveis, deve-se considerar a metodologia de Maillet, baseada na avaliação do escoamento de base da drenagem de superfície, mediante a identificação e quantificação dos parâmetros hidrológicos das bacias de interesse, através de :

- monitoramento hidroclimatológico (redes de estações climatológicas, pluvio, fluvio e piezométricas).

A avaliação do potencial aquífero segundo esta metodologia, permite uma visão homogênea do comportamento do aquífero, uma vez que, a interligação de topo dos "Tanques" armazenadores, através da drenagem de superfície, possibilita a identificação das vazões de base médias de uma determinada área, fornecendo também indicativos para a análise do impacto ambiental ocorrido durante a exploração do mesmo.

O impacto natural da carstificação no meio físico, segundo grandes compartimentos (bacias hídricas principais), reflete-se em eventos e processos de longa duração dentro da escala de tempo da vida humana, com riscos atenuados e quase imperceptíveis, sendo representados na área em questão por :

- relevo acidentado em relação ao compartimento do Embasamento Cristalino, diferenciado pelo intenso intemperismo químico atuante, o qual dificulta a urbanização da área ;
- captura da bacia de menor gradiente, ou seja, a bacia do Iguaçu pela de maior gradiente que é a bacia do Ribeira, com perda gradativa de área de captação e vazão da primeira para segunda ;

- modificação do regime deposicional, promovendo sedimentação aluvionar grano decrescente, nas várzeas da bacia capturada, devido perda de área de bacia de contribuição e vazão ;
- aumento gradativo da carga sólida transportada na bacia captadora pelo incremento de área de contribuição e conseqüente aumento de vazão.

O entendimento deste impacto de longo prazo, pode auxiliar no que se refere ao gerenciamento dos recursos hídricos e planejamento urbano para uso das populações assentadas na região, adequando as ações de manejo às características evolutivas do aquífero.

Mediante este entendimento, algumas linhas de conduta estratégica podem ser adotadas :

- privilegiar o compartimento do Embasamento Cristalino, para absorver crescimento urbano futuro, da Região Metropolitana de Curitiba ;
- priorizar a exploração do aquífero cárstico na bacia do Ribeira, em compartimentos próximos ao divisor de bacia (Iguaçu/Ribeira), transpondo vazão e invertendo a tendência natural existente ;
- utilização da bacia do Ribeira para dissipação e armazenamento de volumes excedentes em épocas de cheias ;
- eleger a região do aquífero como área de proteção de manancial, estabelecendo regulamentação pertinente quanto ao uso do solo ;
- promover a regularização da drenagem de superfície nos domínios do aquífero mediante pequenas barragens nas células compartmentais.



## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M. de. 1956. Novas ocorrências de fósseis no Pré Cambriano brasileiro. *An. Acad. Bras. Ci.*, **28**(4): XLIV-XLV.
- ATKINSON, T. C. 1977. Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain). *Journal of Hydrology*, **35**: 93-110.
- AULER, A. 1986. Carste e gênese de cavernas. In: GEEP-AÇUNGUI Curitiba, Curso de extensão universitária em espeleologia, GEEP-Açungui. 40 p.
- BARTH, F. T.; POMPEU, C. T.; FILL, H. D.; TUCCI, C. E. M.; HELMAN, J.; BRAGA JR, B. P. F. 1987. *Modelos para gerenciamento de recursos hídricos*. São Paulo, Nobel/ABRH. 526 p.
- BERTONI, J. C. & TUCCI, C. E. M. 1993. Precipitação. In: TUCCI, C.M.E. organizador. *Hidrologia : ciência e aplicação*. Porto Alegre, Ed. da Universidade do Rio Grande do Sul, ABRH, EDUSP. p. 177-241.
- BIGARELLA, J. J. 1948. Estudos preliminares na Série Açungui II - Rochas calcáreas. *Arq. Biol. Tecnol.*, **3**:201-354.
- BIGARELLA, J. J. 1953. Estudos preliminares na Série Açungui III - Rochas calcáreas da faixa central e sua classificação. *Arq. Biol. Tecn.*, **8**:473-502.
- BIGARELLA, J. J. & SALAMUNI, R. 1956. Estudos preliminares na Série Açungui V - Estruturas organógenas nos dolomitos da Formação Capiçu, estado do Paraná. *Dusenya*, **7**(6):317-23.
- BIGARELLA, J. J. & SALAMUNI, R. 1958a. Contribuição à geologia da região sul da Série Açungui (Paraná). *Bol. Paulista de Geog.*, **29**: 3-19.
- BIGARELLA, J. J. & SALAMUNI, R. 1958b. Estudos preliminares na Série Açungui VIII - A Formação Votuverava. *Bol. Inst. Hist. Nat. Geol.*, nº 2, 6 p.
- BIGARELLA, J. J.; MOUSINHO, M. R.; SILVA, J. X. 1965. Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil. *Bol. Par. Geogr.*, **16/17**: 117-51.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F.; PASSOS, E.; SUGUIO, K. 1994. *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais*. Florianópolis, Ed. UFSC. 3v, V.1, 425 p.
- BITTENCOURT, A. V. L. 1994. Hidroquímica. Módulo II. In: Curso Sul-Americano sobre Avaliação e Vulnerabilidade de Aquíferos, 1, Curitiba, 1994. *Memória...*,

- Curitiba, UFPR, ABAS, Universidad de la Republica Oriental del Uruguay, p. 23-53.
- BONACCI, O. 1987. *Karst hydrology, with special reference to the Dinaric karst*. Berlin, Springer-Verlag. 184 p.
- BONACIM, E. A. 1996. *Hidrogeologia da região de Tranqueira - Almirante Tamandaré- Curitiba*, 234 p. (Dissertação de mestrado - Instituto de Geociências/UFPR).
- BOTTURA, & ALBUQUERQUE FILHO, . 1990. CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICAS NO PROCESSO DE SUBSIDÊNCIA EM CAJAMAR, SP. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 6, PORTO ALEGRE, 1990. *ANAIS...* PORTO ALEGRE, ABAS., P. 216-25.
- CAMPANHA, G.; BISTRICHI, C. A.; ALMEIDA, M. A. 1987. Considerações sobre a organização litoestratigráfica e evolução tectônica da faixa de dobramento Apiaí. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, 1987. *Atas...* Curitiba, SBG. v.2, p.725-42.
- CASTANY, G. 1971. *Tratado practico de las águas subterrâneas*. Ediciones Omega, Barcelona. 256 p.
- CEHPAR - CENTRO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGIA PROF. PARIGOT DE SOUZA. 1988. *Estudos hidrológicos do Alto Iguaçu. Projeto HG-57*. Relatório final, primeira fase. Curitiba, CEHPAR. 101 p.
- CEHPAR - CENTRO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGIA PROF. PARIGOT DE SOUZA. 1990. *Estudos hidrológicos do Alto Iguaçu. Projeto HG-57*. Relatório final, segunda fase. Curitiba, CEHPAR. 53 p.
- CHRISTOLOLETTI, A. 1979. *Análise de sistemas em geografia*. São Paulo, Hucitec. 106 p.
- CHRISTOLOLETTI, A. 1980. *Geomorfologia*. 2 ed. São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda. 188 p.
- COPEL. 1995. Programa HG-77 - regionalização de vazões em pequenas bacias hidrográficas no Estado do Paraná. COPEL, Curitiba.

- CORDANI, U. G. & BRITO NEVES, B. B. 1982. The geologic evolution of South America during the Archean and Early Proterozoic. *Revista Brasileira de Geociências*, **12**(1-3):78-88.
- COSTA SOUZA, E. L. da; LISBOA, A. A.; FONTANA, M. A. 1992. *Relatório do projeto karst após execução da TP 001/92-DT*. Curitiba, SANEPAR, Gerência de Hidrogeologia, relatório interno. 16 p.
- CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M. R. 1976. *Hidrologia subterrânea*. Barcelona, Ediciones Omega. 2347 p.
- DIAS, M. V. F. & SALAZAR JR, O. 1987. Geologia da sequência Antinha - Grupo Açungui, PR. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, 1987. *Atas...* Curitiba, SBG. v. 1, p. 263-79.
- DNAEE - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1995. Dados hidrológicos. Estações Colombo (1975-1985), Juruqui-Alm. Tamandaré (1986-1995), Montante Aterro Sanitário (1994-1995). Curitiba, Banco de Dados Regional do Sistema de Informação de Dados Hidrológicos, DNAEE.
- ELLERT, N. 1978. Eletorresistividade aplicada à prospecção de água em rochas cristalinas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. *Anais...* Recife, SBG., p. 2256-2262.
- ENGEMIN - ENGENHARIA E GEOLOGIA LTDA. 1995b. *Problemática geotécnica na exploração do karst*. Curitiba, ENGEMIN. 30 p.
- FAIRCHILD, T. 1982. New stromatolites from the Upprer Pre-Cambriam Açungui Group, eastern Paraná, Brazil and their potencial stratigraphic use. *Bol. IG/USP*, **13**:43-50.
- FIORI, A. P. 1990. *Tectônica e estratigrafia do Grupo Açungui a norte de Curitiba*. São Paulo, 261 p. (Tese de livre-docência - Instituto de Geociências/USP).
- FIORI, A. P. 1992. Tectônica e estratigrafia do Grupo Açungui - PR. *Bol. IG-USP, Série Científica*, **23**:55-74.
- FIORI, A. P. 1994. Evolução geológica da Bacia Açungui. *Bol. Paran. Geoc.*, **42**:7-27.
- FIORI, A. P. & GASPAR, L. A. 1993. Considerações sobre a estratigrafia do Grupo Açungui (Proterozóico Superior), Paraná, sul do Brasil. *Boletim IG-USP, Série Científica*, **24**:1-19



- FORD, D. C. & WILLIAMS, P. W. 1985. *Karst geomorphology and hydrology*. London, Unwin Hyman, 601 p.
- FRAGA, C. G. 1994. Análise introdutória à hidrogeologia do "karst" paranaense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8, Recife, 1994. *Anais...* Recife, ABAS/DNPM/CPRM, p.244-55.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. 1979. *Groundwater*. New Jersey, Prentice-Hall, 604p.
- FUCK, R. A.; MARINI, O. J.; TREIN, E.; MURATORI, A. 1971. Geologia do leste paranaense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, São Paulo, 1971. *Anais...* São Paulo, SBG., p. 121-30.
- GAGEN, P. & GUNN, J. 1987. A geomorphological approach to restoration blasting in limestone quarries. In: BECK, B.F. & WILSON, W.L. ed. *Karst hydrogeology : Engineering and environmental applications*. Rotterdam, A.A. Balkema. p. 457-61.
- GALE, S. J. 1984. The hydraulics of conduit flow in carbonate aquifers. *Journal of Hydrology*, 70: 309-27.
- GEA - GEOLOGIA E ENGENHARIA AMBIENTAL LTDA. 1994. *Levantamentos geofísicos, Tranqueira - Alm. Tamandaré*. Relatório final, Curitiba, Geologia e Engenharia Ambiental Ltda. 85 p.
- GIANNINI, P. C. F. 1993. *Sistemas deposicionais no Quaternário costeiro entre Jaguaruna e Imbituba*, SC. São Paulo, V. 1, 278 p. (Tese de Doutorado - Instituto de Geociências/USP).
- GIUSTI, D. A. & JOSÉ, C. 1994. Métodos elétricos em áreas cársticas do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, Balneário Camboriú, 1994. Boletim de Resumos Expandidos, Balneário Camboriú, SBG., p. 27-28.
- GUERRA, A. M. 1986. *Processos de carstificação e hidrogeologia do Grupo Bambuí na região de Irecê, Bahia*. São Paulo, 132 p. (Tese de Doutorado - Instituto de Geociências/USP).
- GUERRA, A. M. & MELLO, J. C. 1986. Locação de poços com base na relação entre estrutura e feições cársticas - Grupo Bambuí - Irecê - BA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4. Brasília, 1986. *Anais...*Brasília, ABAS/DNAEE/DNPM., p. 208-20.

- HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; COIMBRA, A. M. 1975. The Ribeira Folded Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, 5(4): 257-66.
- HOBBS, B. E.; MEANS, W. D.; WILLIAMS, P. F. 1976. *An outline of structural geology*. New York, John Wiley & Sons. 567 p.
- IAPAR- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. 1978. *Cartas climáticas básicas do Estado do Paraná, 1978*. Londrina, Fundação Instituto Agrônômico do Paraná. 38 p.
- IAPAR-INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. 1995. Dados hidrometeorológicos. Estação Fazenda Experimental da Faculdade de Agronomia, período 1986-1995. Londrina, Banco de Dados Hidrometeorológicos, IAPAR.
- ITCF - INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E FLORESTAS. 1987. *Atlas do Estado do Paraná*. Curitiba, ITCF. 73 p.
- JICA - JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. 1995. *The master plan study on the utilization of water resources in Paraná State in the Federative Republic of Brazil*. Tokyo, draft final report, sectorial report Hydrogeology and Groundwater, vol. C. 39 p.
- KARMANN, I. 1989. *Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto Vale do Rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo*. São Paulo, 228 p. (Tese de Doutorado - Instituto de Geociências/USP).
- KLEIN, R. 1962. Fitofisionomia e notas sobre a vegetação para acompanhar a planta fitogeográfica de parte dos municípios de Rio Branco do Sul, Alm. Tamandaré e Colombo (PR). *Bol. UFPR. Inst. Geol. e Geogr. Fís.*, nº 3, 93 p.
- KOHLER, H. C. 1994. Geomorfologia cárstica. In: GUERRA, A.J.T. & CUNHA, S.B. da, organizadores. *Geomorfologia fluvial: uma atualização de conceitos*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil. p. 309-334.
- KOHLER, H. C. 1989. *Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa - MG*. São Paulo, 113 p. (Tese de Doutorado - Departamento de Geografia/USP).
- KRESIC, N. A. 1992. Review and selected bibliography on quantitative definition of karst hydrogeological systems. *International Contributions to Hydrogeology*, 13:51-87

- LATTMAN, L. H. & PARIZEK, R. R. 1964. Relationship between fracture traces and the occurrence of ground water in carbonate rocks. *Journal of Hydrology*, 2(2): 73-91.
- LEIGHTON, M. W. & PENDEXTER, C. 1962. Carbonate rock types. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, Mem. 1, 33-61.
- LIMA, S. A. 1986. *Mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Barigui. Curitiba, 51 p. (Trabalho de graduação do curso de geografia - Departamento de Geografia/UFPR).*
- LINO, C. F. & ALLIEVI, J. 1980. *Cavernas brasileiras*. São Paulo, Melhoramentos. 168 p.
- LLADÓ, N. L. 1970. *Fundamentos de hidrogeologia cárstica*. Madrid, Editorial Blume. 269 p.
- LISBOA, A. A. & BONACIM, E. A. 1995. Sistema aquífero cárstico - reservatório elevado da região metropolitana de Curitiba. *Sanare*, 4(4):26-30.
- LISBOA, A. A.; MAXIMIANO, G. A.; VIANNA, P. C. G.; SILVA, R. 1996. Mapeamento e compartimentação do aquífero cárstico na região metropolitana de Curitiba por um SIG. In: CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2, Curitiba, 1996. *Anais...* Curitiba, Editora SAGRES, no prelo.
- LUZ, C. R. F. da. 1992. *Levantamento das formas cársticas e sua utilização na parte noroeste do município de Colombo e seus arredores*. Curitiba, 62 p. (Trabalho de graduação do curso de geografia - Departamento de Geografia/UFPR).
- MAACK, R. 1968. Geografia física do Estado do Paraná. Curitiba, Livraria José Olympio Editora S. A, 442 p.
- MAGALHÃES, P. C de. 1989. Hidrologia superficial. In: RAMOS, F. organizador. *Engenharia Hidrológica*. Rio de Janeiro, Editora UFRJ/ABRH. p. 201-89.
- MAILLET, E. 1905. *Mécanique et physique du globe: essai d'hydraulique souterraine et fluviale*. Paris, Editora A. Hermann, 218 p.
- MARINI, O. J.; TREIN, E.; FUCK, R. A. 1967. O Grupo Açungui no Estado do Paraná. *Bol. Paran. Geoc.*, 23/25:43-103.
- MARINI, O. J. & BOSIO, N. J. 1969. Estromatólitos algáceos em dolomitos do Grupo Açungui. *Ciência e Cultura*, 21:219-20.

- MENEGASSE, L. N. 1991. *Estudo hidrogeológico das rochas metassedimentares do Grupo São Roque a NW da grande São Paulo - Critérios para locação de poços profundos*. São Paulo, 104 p. (Dissertação de mestrado - Instituto de Geociências/USP).
- MILANOVIC, P. T. 1981. *Karst hydrogeology*. Littleton, Water Resources Publication, 434 p.
- MINEROPAR. 1987. *Perfil econômico - Mercado produtor de rochas calcárias no Estado do Paraná*; 1986. Curitiba, 38 p.
- MYLROIE, J. E. 1987. Influence of impermeable beds on the collapse of bedrock voids in the vadose zone. In: BECK, B.F. & WILSON, W.L. ed. *Karst hydrogeology : Engineering and environmental applications*. Rotterdam, A.A. Balkema. p. 95-99.
- NADAL, C. A.; RATTON, E.; ROSA FILHO, E. F.da; GIUSTI, D. A.; BITTENCOURT, A. V. L.; JULIANO, K. A. 1995. Monitoramento de subsidências do terreno devido a exploração de aquífero cárstico. In: ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 9, MERCOSUL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1, Curitiba, 1995. *Anais...* Curitiba, ABAS., p. 83-87.
- NAKAGAWA, V. A.; PRANDINI, F. L.; ÁVILA, I. G. de; POÇANO, W. L.; BRAGA, A.C. de O., BOTTURA, J.A.; SANTORO, E. 1987. Cajamar - carst e urbanização : investigação e monitoramento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, São Paulo, 1987. *Anais...* São Paulo, ABGE, p.431-41.
- OKA FIORI, C. 1987. Análise morfológica das vertentes da região do Médio Rio Iguaçu. PR. *Resumo das comunicações da 39ª Reunião anual da SBPC. Brasília*.
- OLIVEIRA, E. P. de. 1927. Geologia e recursos minerais do estado do Paraná. *Monogr. Serv. Geol. Mineral. Bras.*, nº 6, 172 p.
- PRANDINI, F. L.; NAKAGAWA, V. A.; ÁVILA, I. G. de; OLIVEIRA, A. M. S.; SANTOS, A.R. dos. 1987. Cajamar - carst e urbanização : zoneamento de risco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, São Paulo, 1987. *Anais...* São Paulo, ABGE, p.461-70.



- REIS NETO, J. M. & SOARES, P. C. 1987. Um estudo de caracterização termodinâmica de micro-estruturas dos grupos Açungui e Setuva (PR). In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, 1987. *Atas...* Curitiba, SBG. v.1, p.147-65.
- ROSA FILHO, E. F. da. 1993. Caracterização da depleção de um aquífero através do coeficiente de descarga,  $\alpha$ , de Maillet. *Bol. Paran. Geoc.*, UFPR, Curitiba, **41**:125-44.
- ROSA FILHO, E. F. da; LISBOA, A. A.; SCHOENAU, O. 1996. Abastecimento de água de Curitiba - situação atual e proposta de solução. In: Workshop Internacional Ampliações dos Sistemas de Abastecimento de Água Potável nas Grandes Metrópoles, 1, Belo Horizonte, 1996. *Atas...*Belo Horizonte, no prelo.
- SANCHEZ, L. E. 1984. Cavernas e paisagem cárstica do Alto Vale do Ribeira/SP: uma proposta de tombamento. *Espeleo-Tema*, **14**:9-21.
- SANCHEZ, L. E. 1992. O sistema, unidade lógica de referência dos estudos espeleológicos. *Espeleo-Tema*, São Paulo, **16**:3-14.
- SILVA, A. B. da. 1984a. *Análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais*. São Paulo, 190 p. (Tese de Doutorado - Instituto de Geociências/USP).
- SILVA, A. B. da. 1984b. Evolução química das águas subterrâneas. *Águas Subterrâneas*, **7**:05-12.
- SILVA, A. B. da. 1986. Contribuição da geologia estrutural na exploração de águas subterrâneas do Grupo Bambuí na região norte do Estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4. Brasília, 1986. *Anais...*Brasília, ABAS/DNAEE/DNPM., p. 251-62.
- SILVA, R. da. 1991. *Identificação de formas cársticas através de análises geomorfológicas (das quadriculas A-90, A-100, A-101) da região metropolitana de Curitiba*. Curitiba, 68 p. (Trabalho de graduação do curso de geografia - Departamento de Geografia/UFPR).
- SMITH, D. I. 1978. Applied geomorphology and hydrology of karst regions. In: HAILS, J.R. ed. *Applied geomorphology*. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company. p. 85-118.

- SOARES, P. C. 1987. Sequências tecto-sedimentares e tectônica deformadora no centro-oeste do escudo paranaense. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, 1987. Atas... Curitiba, SBG. v.2, p.743-71.
- STEARNS, W. D. & FRIEDMAN, M. 1972. Reservoirs in fractured rock. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, Memoir 16, 82-106.
- SUMMERFIELD, M. A. 1994. *Global geomorphology: An introduction to the study of landforms*. Essex, Longman Scientific & Technical. 533 p.
- SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. 1997. *Atlas Hídrico do Estado do Paraná*, (No prelo)
- SUREHMA - SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE. 1986. *Estudo da bacia hidrográfica do Rio Barigui*. Curitiba, SUREHMA. 82 p.
- TEDESCO, O. M. 1989. *O cultivo da bracatinga (Mimosa scabrella Benth) como alternativa para a conservação do solo - município de Bocaiúva do Sul - PR*. Curitiba, 99 p. (Trabalho de graduação do curso de geografia - Departamento de Geografia/UFPR).
- TUCCI, C. E. M. & BELTRAME, L. F. S. 1993. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C.M.E. organizador. *Hidrologia : ciência e aplicação*. Porto Alegre, Ed. da Universidade do Rio Grande do Sul, ABRH, EDUSP. p. 253-88.
- UNESCO - UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. 1974. *Methods for water balance computations*. Paris, UNESCO. 170 p.
- UNESCO. 1983. *International legend for hydrogeological maps*. Paris, UNESCO, IAH, IAHS. 51 p.
- VAINE, J. L. 1995. *Balanço hídrico da bacia do rio Passaúna*. Curitiba, SUDERHSA, relatório interno. 70 p. no prelo.
- VENI, G. 1987. Fracture permeability : Implications on cave and sinkhole desenvolvimento and their environmental assessments. In: BECK, B.F. & WILSON, W.L. ed. *Karst hydrogeology : Engineering and environmental applications*. Rotterdam, A.A. Balkema. p. 101-05.

- VIEIRA, M. A.; DREWS, M. G. P.; NETTO, C. 1991. *Prospecção geofísica de cobre, chumbo e zinco na Formação Itaiacoca - Pr. Belo Horizonte*, DNPM, Centro de Geofísica Aplicada. 50 p.
- WILLIAMS, P. W. 1983. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, **61**(1-3):45-67.
- YEVJEVICH, V. 1976. Advanced approaches to karst hydrology and water resource systems. In: YEVJEVICH, V. ed. *Karst Hydrology*. Fort Collins, Water Research Publications, v. 1, p. 209-20.